جمهورية العراق

وزارة التربية

المديرية العامة للتعليم المهنية

العلوم الصناعية
الخزف والزجاج
الصف الثاني

تأليف

د. شهاب احمد زيدان الجبوري

د. انغام سعدون العزاوي

د. جميـــل حبيـــب غـــازي

زهـراء صـــلاح احمـــد

انـــغـــام خـــاجيـك تكـــلان

رشـــا عدنان عبد الهادي

سميرة مجيد عيدان

الطبعة الثانية

1440 هـ - 2019 م

عزيزي الطالب ..... عزيزتي الطالبة

أولت وزارة التربية أهتماماً خاصاً في تطوير مناهجها الدراسية ومنها مناهج التعليم المهني . وقد وضعت لجنة تأليف مادة العلوم الصناعية ـ أختصاص الخزف والزجاج ـ للصف الثانية الفرع الصناعي نصب اهتمامها أثراء محتوى مفردات المنهج الجديد لهذه المادة بما يشجع الطالب ويشوقه لمتابعة الاستزادة من هذا العلم الحيوي آخذين بنظر الاعتبار المرحلة العمرية الحساسة للطالب وما يدرسه في السنوات السابقة من هذه المادة .

يضم هذا الكتاب (ـ الفصل الأول ـ مقدمة في الفخر ـ الفصل الثاني ـ تقنية الفخر ـ الفصل الثالث ـ الافران ـ الفصل الرابع ـ عملية التزجيج ـ الفصل الخامس ـ نظرية سيجر ـ الفصل السادس ـ الحراريات ـ الفصل السابع ـ خواص المواد السيراميكية) . ويحتوي كل فصل على مفاهيم جديدة مثل هل تعلم ، تذكر ، سؤال ، فكر ، بالإضافة الى مجموعة كبيرة من التدريبات والأنشطة المتنوعة ليتعرف الطالب من خلالها على مدى ما تحقق من أهداف ذلك الفصل .

نسأل الله عز وجل أن تعم الفائدة من خلال هذا الكتاب ، وندعوه سبحانه أن يكون ذلك أساس عملنا والذي يصب في حب وطننا والأنتماء اليه والله والي التوفيق .

نقدم الشكر والتقدير الى السادة الاختصاصيين التربويين لمساهمتهم العلمية في هذا الكتاب ، كما نقدم الشكر والتقدير لكل من الأستاذ الدكتور(عبد الخالق فوزي حمود) والدكتورة (سناء عبد الهادي حافظ) لمراجعتهم العلمية للكتاب .

المؤلفون

فهرست الكتاب

المقدمة

الفصل الأول 5

مقدمة في الفخر 6

الفصل الثاني 10

تقنية عملية الفخر 12

الفصل الثالث 80

الأفران 82

الفصل الرابع 112

عملية التزجيج..... 115

الفصل الخامس 135

نظرية سيجر 136

الفصل السادس 145

الحراريات.....147

الفصل السابع 179

خواص المواد السيراميكية 181

الفصـــــــــــل الأول

مقدمة في الفخر



الفصـــــل الاول

مقدمـــــــــــــــــة في الفخـــــر :

منذ بدء التأريخ عرف الأنسان الأطيان كمادة خام طبيعية متوفرة أستطاع العمل بها وأنشاء اشكال فنية كالجرار والاواني المستخدمة في خدمته التي كانت جزءا من حاجته الملحة ، وبتطور قدرة الأنسان بالسيطرة على الطبيعة حوله، استطاع ان يحول تلك الاشكال الطينية التي لاتقاوم عوامل الزمن الى منتوجات اكثر صلابة ومقاومة ويمكن لها الاستمرار لمئات بل لألوف السنين من خلال ابتكار عملية الفخر.

فقد وجدت الاثار الانسانية الشاخصة تلك الشواهد على مدى التقدم الحضاري للأمم باكتشاف اللقى الفخارية والخزفية التي قاومت عوامل الطبيعية وظروف الزمن وظلت تحكي قصص البشرية وتؤرخ لوجود الانسان وعاداته وثقافته وتطوره .



أستخدم الفخار وسيلة للتعبير على مر العصور ، حتى قبل بدء التاريخ ،فقد اظهرت القطع الطينية والفخارية المعنى الحقيقي للفن والجمال، كذلك استخدم الفخار لسرد القصص أو التركيز عليها، وقد استخدم الطين للتضرع للآلهة والملوك، وقد تم استخدامه للتعبير عن المثل الاجتماعية والدينية.

لقد كان الظهور الأول للفخار في العراق في العصور القديمة، وتعد قرية جرمو من اقدم المناطق في العالم التي عرفت الفخار، وربما يكون ظهوره الأول لأغراض نفعية استهلاكية ، وذلك لكون اطيانه كانت كثيرة الشوائب وغير نقية فهي البدايات ولم يكن الصانع قد اهتم كثيرا بالشكل أوالصنعة فكانت عفوية وساذجة الصنع، وقد كانت كثرة الشوائب والمواد العضوية فيها قد منحتها تماسكا يتطلبه هذا النوع من الحرق الذي كان يتم على الاغلب في حفر في باطن الارض او في الهواء ،وقد تكون الطريقة هي في عمل حفر في الارض وتملأ بالأخشاب والنباتات اليابس والتبن ويتم اشعالها ، وتعمل الشوائب هنا دور المواد غير اللدنة التي تمنح الاطيان مسامية عالية مما يساعدها على مقاومة الصدمات في ظروف حرق كهذه ، وتطورت تقنيات صناعة الخزف في الادوار التي تلي دور جرمو في العراق القديم ، من أستخدام الحفر الى أستخدام الكورة أو الأفران الأرضية من أجل ايجاد ظروف حرق اكثر أمانا وأفضل انتاجا ، ثم تطورت تقنيات الحرق كثيرا حتى وصلت الى أفضل مراحلها في الوقت الحاضر ، ولكن بقيت تلك التقنيات البدائية الأولى طرقا مهمة متجددة لاحداث التقنيات المختلفة التي مازال الخزافون يستخدمونها الى الان ، اذ مازالت تستخدم في بعض المدن الاوربية وفي أمريكا وأفريقيا او في اليابان حيث تستخدم تلك الطرق في الحرق لأغراض أحتفالية او طقوسية.

أن عملية الفخر هي احدى العمليات الدقيقة والمعقدة في مراحل الانتاج الفني الخزفي ، وهنا يكون امتحان للخزاف لمعرفة قدرته وامكانيته في انتاج اشكال فنية جيدة لان اي تنفيذ سيء او اهمال ينكشف منهما سوء تنفيذ الخزاف او قلة خبرته او اهماله لتفاصيل مهمة في التنفيذ تؤدي الى فشل انتاجه ، فإننا نواجه اما رضا عند نجاح عملية الفخر واخراج القطع ناضجة وفي حالة جيدة بلا تشوهات ،وبخيبة الامل عند فتح الفرن وظهور التكسر او التشققات وفشل تكامل عملية الفخر التي ستؤدي الى فشل الانتاج وخسران القطع الفنية بعد مراحل العمل المتعبة والخسارة في الوقت.

وبما ان الفرن هو اكثر مادة مكلفة في معدات تصنيع فن الفخار والخزف ، لابد من اخذ الاحتياطات التامة عند شراء او تصنيع الافران الخاصة بالفخر والتزجيج ، واختيار النوع المناسب

الذي يتفق مع نوع الاطيان وطرق الحرق ومع ما يصنع حتى تكون عملية الفخر عملية صحيحة ولايتسبب الفرن في فشل الانتاج او يكون خطر الاستعمال.

وللتعريف اكثر بمعنى مصطلح الفخار ـ فذلك يساعد على استيعاب تلك العملية المهمة في مراحل النتاج الخزفي ـ فالفخار يشمل اي شكل او تكوين نفذ بالطين الخام الطبيعي واكتسب صلابة وقوة تحمل بتاثير الحرارة المسلطة عليه لغرض الانضاج ، ان قلب عملية الفخر هو درجة حرارة الفرن ، وهو ما يمثل نجاح عملية الفخر، وبدون النار والحرق (التسوية)سيبقى الطين دائما كأصله طيناً بخواصه الكيمياوية التي من اهمها الذوبان بالماء وخاصية التفتت وعدم الصلابة والمقاومة ، وهو ما لا يرغب به الخزاف ، فانه من خلال درجات الحرارة العالية بعملية الحرق، سيصبح الطين الناعم قويا صلبا مقاوما ومهيئا لعملية الحرق الاخرى ليصبح مزججا(سيراميك) صقيلاً قوياً ، هذا هو مانعنيه بهذه العملية وهي (الفخر).

ان عملية الحرق (الفخر)تتم بعدد من الطرق منها ماهو قديم وبدائي ومنها ماهو جديد حديث ومتطور ، ولكن مانريد الحصول عليه هو النتيجة النهائية اي الحصول على الجسم الصلب المقاوم ، ومن هذه الطرق ما يحرق بالهواء الطلق او داخل حفر ومنها ما يحرق بنشارة الخشب او فضلات الحيوانات اوالاعشاب او المطاط اوالخشب وهناك الحرق بالوقود كالنفط او الغاز او وقود الطاقة الكهربائية ، والمهم هو الحصول على الانتاج الجيد وقوة وصلادة الجسم الفخاري واحيانا لاحداث التاثيرات التقنيات الجميلة على سطح القطعة .

في وقت متأخر في بداية القرن (19 م) ، غيرت الفنون والحرف حركة مفهوم الفخار والسيراميك ، فما كان سابقا يعد نفعيا اصبح الان عملية يملؤها الفهم والتركيز على التفاعل بين الخزاف والطين و الفخار كفن ، والتي شددت على أن تقيم صناعة الفخار كعملية فنية خاصة بدءا بخطواتها وانتهاءا بتكامل المنتوج الخزفي .فقد سعت الحركات الفنية المعاصرة على اخراج فن الفخار والخزف من سلطة الحرفة اوالنفعية الى الانتشار الفني بالتلاعب بالشكل وتقنيات الفخر واللون،ليصبح من الفنون المهمة بتقنياته المتميزة في الوقت الحاضر.

والخزافون اليوم ، لديهم فهم كامل ، أنه يمكن أن تمتزج الحرفة بالعلم في تكوين الاشكال الفنية الفخارية في تشكيل الاجسام الطينية ومن خلال خبرة ومعرفة الخزاف باستخدام الافران وطريقة

الانضاج والحرق الاولي والتي هي الخطوات الوسطيه الاكثر اهمية في انجاز فن الفخار والخزف ، وفي محترفات الخزاف تكون التجربة مهمة في انجاح عملية الفخر وتقنياتها.

اسئلة الفصل الاول

1- أعط مقدمة لأهمية صناعة الفخار عبر العصور.

2- كيف بدأت وتطورت الافران في بداية الحضارت.؟

3- ماهي استخدامات الفخار في العصور القديمه

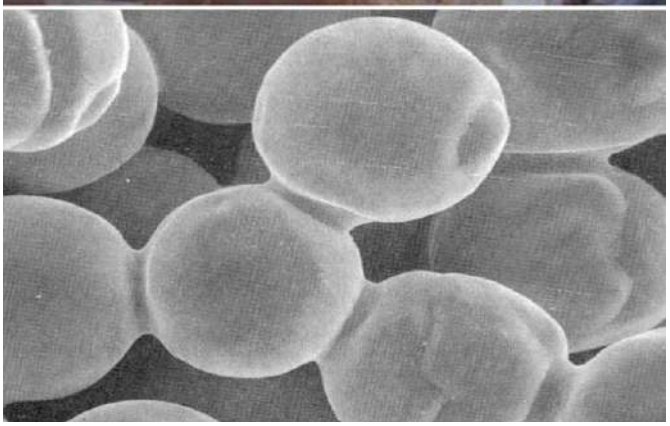
4- أ- وتعد قرية ..... من اقدم المناطق في العالم التي عرفت الفخار

ب- ان عملية الحرق تتم بعدد من الطرق منها ماهو .....

الفصل الثاني

تقنية الفخر





أهداف الفصل الثانى :

من المتوقع أن يتعرف الطالب على :

1- كيفية تعبئة وتفريغ الأفران من المواد الخزفية .
2- معرفة التغيرات في الجسم الخزفي نتيجة الفخر.
3- معرفة آلية تلبيد الأجسام السيراميكية المتقدمة.

محتويات الفصل الثانى

(2-1) تقنية عملية الفخر.
(2-2) سلوكية المواد الخزفية في أثناء الفخر .
(2-3) التفاعلات الكيمياوية في أثناء عملية الفخر .
(2-4) تأثير عملية الفخر على الخواص النهائية للمنتوج .
(2-5) النمو البلوري .
(2-6) النمو الحبيبي .
(2-7) اللون .
(2-8) المسامية .
(2-9) التقلص .
(2-10) مشاكل وعيوب عملية الفخر وطريقة المعالجة .
(2-11) تلبيد السيراميك المتقدم.
(2-12) تأثير عمليات التلبيد على الكثافة.
(2-13) العوامل المؤثرة في عملية التلبيد.
(2-14) التلبيد بالطور السائل.

الفصل الثاني

1-2 تقنية عملية الفخر Firing process Technique

تعد تقنية حرق الأطيان لتهيئتها كفخار مرحلة مهمة جدا في إنهاء العمل الخزفي وهي مرحلة وسطية تعتمد التصلب كأساس لتطبيق التزجيج الملون للإنضاج النهائي. إن تسوية الطين حراريا وتحوله إلى فخار هو أساس ديمومته عبر آلاف السنين ،ولكل طينة مستوى حراري معين يوصلها الى الصلابة الأمثل طبقا لتركيبته ونوع ونسب المركبات الصاهرة فيه ،لذا يتوجب على الخزاف ومصانع الإنتاج الخزفي التعرف بدقة على تركيب الطينة المستخدمة قبل البدء بالإنتاج لغرض تحديد صلاحيتها ،ودرجة حرارة أعلى صلابة ممكنة دون حصول تشوه او انهيار في الشكل مع تقبلها الايجابي لطبقة التزجيج.

إن تقنية الفخر هي العملية التي يكتسب بها الجسم الفخاري قوة وصلابة وقدرة تحمل ميكانيكية وديمومة نتيجة لتعرضه الى درجة حرارة التصلب المثالية وهي الدرجة الحرارية التي تكتسب بها كتلة الطين اعلى كثافة وصلابة ممكنة دون حصول تشوه او انصهار في شكل العمل الخارجي .

يحصل التصلب علميا عند تعرض الطين الى درجة حرارة تعتمد قيمتها على تركيب الطين ونوع ونسبة المركبات غير الطينية فيه ،اذ تبدأ عملية الفخر فعليا فوق درجة حرارة الاحمرار (700 درجة مئوية)، فمثلا ان الأطيان الحمراء الشائعة (كطينة العراق) تقع ضمن المجموعة المتدنية حراريا (الترابية Earthen Ware) وتصل درجة حرارة التصلب النهائية لها لغاية

(1150درجة مئوية) وغالبا ادنى من ذلك ، لأنه بعد هذه الدرجة يبدأ بالانصهار والميوعة.

أما الأطيان ذات الحرارة المرتفعة (الحجرية Stone Ware) فهي تتجاوز(1250

درجة مئوية) ، والسبب هو احتواء الأطيان الترابية واطئة الحرارة على نسبة من المواد الصاهرة كالقلويات والحديد أكثر منه في الطين الحجري عالي الحرارة ، في حين ان نسبة المواد المقاومة حراريا تكون بأقل من نسبة تواجدها مع الأطيان الحجرية ، وهناك أطيان أخرى نقية كالبورسلين تصل درجة حرارة تصلبها الى أكثر من(1300 درجة مئوية).

من المهم للخزاف ان يفهم جيدا عملية الحرق ،لكي يمكنه تجنب الخسائر الكبيرة، ذلك لان القطعة حتى ولو جففت جيدا قبل الحرق فان بعض الرطوبة يمكن ان تبقى بها ،ويتم التخلص منها في الفرن، وقد مني كثير من الخزافين بمرارة الفشل والخيبة عند انفجار بعض القطع الخزفية في الفرن ،ويعزى هذا مباشرة الى ارتفاع الحرارة اكثر من اللازم قبل تبخر الرطوبة، فان الحرارة اذا كانت عالية اكثر من اللازم في البداية فان الماء الذي بداخل القطعة يتحول الى بخار بسرعة كبيرة بحيث لا يمكنه ان يتسرب من مسام الطينة الدقيقة ، ويتراكم البخار داخل القطعة حتى يزداد ضغطه الى درجة كبيرة تؤدي الى انفجار القطعة الخزفية، فاذا كان بالفرن قطع طينية محروقة فان القطعة المنفجرة فقط هي التي تضيع، اما اذا كان بالفرن قطع مزججة اثناء الحرق فانها تتعرض للتلف بسبب شظايا الجسم المنفجر التي تلتصق بطلائها الزجاجي (وهذا سبب هام جدا في انه لا يصح وضع خزف محروق مع خزف لم يتم حرقه).

ان ابسط طريقة يمكن للخزاف اعتمادها داخل المحترف و تحقق له الغرض المطلوب هو بعمل مجموعة من المكعبات الطينية الصغيرة ،ولتكن مثلا بأبعاد(3 cm) حادة وقائمة الزوايا والحافات ،و بعد إتمام صنع النموذج الطيني و تجفيفه طبيعيا يتم إدخاله الى الفرن لغرض الحرق الحراري بدرجات متعددة تتصاعد بمعدل (50 درجة مئوية) لكل مرحلة ،تبدأ من درجة (850 درجة مئوية) مع الأطيان متدنية الحرارة ،و يتم ملاحظة الشكل مع كل درجة حرارة حتى تبدأ حافات وزوايا المكعب الحادة بالتدوير والانحناء ومعها يتغير لون الفخار و تزداد شدة صلابته ، وبعد تبريده يخرج النموذج من الفرن ويفحص ويعتمد ذلك على الخبرة الشخصية للخزاف ، وتتحدد درجة حرارة الفخر المثلى بما لا يقل عن(50درجة مئوية) كحد أدنى قبل تشوه الجسم وظهور الانحناء وتلف تفاصيل

المكعب وعبور مرحلة الفخر الملائمة ، و لابد من الحرفية العالية بالعمل ، والاستمرار بمراقبة الفرن والقطع داخله من فتحة المراقبة وسط باب الفرن بعد ان توضع المكعبات الطينية بمستوى منظور من الفتحة ، وعندما تصل الحرارة الى الدرجة المحددة الاولى نبدأ بملاحظة النموذج وتصويره باعتماد وهج الفرن الداخلي واحمراره، عند وصول الفرن الى درجة الحرارة المحددة لتصلب النماذج وبحرق متواصل .

وهناك فحوصات اخرى مهمة يمكن ان يعتمدها منتجو الخزف الصناعي غالبا ، مثل فحص الكثافة وقوة الانضغاط والتحملية ، و يمكن ان يتحقق فحص الكثافة على وفق المعادلة التالية:-

$$\text{كثافة النموذج الفخاري } (gm/cm^3) = \frac{\text{كتلة النموذج}}{\text{حجم النموذج}}$$

اما درجة التحملية الميكانيكية والتي تؤشر على مدى مثالية درجة التصلب فهي تنفذ مختبرياً باعتماد جهاز بسيط مكون من صفيحتين حديديتين وجهاز لقياس القوة المسلطة بينهما، يوضع النموذج الفخاري بين صفيحتين ، ويتم تقريبها تدريجيا لحين اول ظهور للتكسر او التمزق بالنموذج عندها تسجل القوة ، وتقاس الوحدة الانضغاطية على وفق الاتي :-

$$\text{القوة الانضغاط}(N/m^2) = \frac{\text{أعلى حمل مسلط}}{\text{مساحة السطح المنضغط}}$$

ونشير هنا الى أن رفع درجة حرارة الحرق المسببة لصلابة الفخار يترافق معها انقاص في نسبة المسامية وزيادة في نسبة التقلص والكثافة مع قوة الانضغاط .

ان عملية الفخر تقنية معقدة لظهور عدد من التفاعلات في أثناء وبعد الحرق ، تؤثر حتما على الخواص العامة للشكل، وهي تعتمد على حرارة الحرق في الفرن وقدرتها في التأثير على المنتوج الفخاري، ومن ثم عملية تبريد المنتوج بعد الحرق، كما تشترك التغيرات في درجات الحرارة

بتحقيق تأثير في التغيرات المهمة والأساسية في الطين، اذ يتحول الطين في هذه العملية من أطيان هشة لينة تماما الى تراكيب صلبة كالصخر ، مقاومة للماء وعوامل الزمن والرياح، وهذا التغير هو جوهري في ذات الطينة ليحولها بصورة كاملة الى مادة أخرى.

تبدأ مرحلة التجفيف الأولى في الفرن وذلك عندما توضع الأجسام الطينية الجافة في الهواء بدرجة حرارة الغرفة والمتصلبة لدرجة (العظم) تقريبا في الفرن، وهذا يسمى التصلب الأولى ، ويحدث التصلب الثاني عندما توضع الأجسام في الفرن وتبدأ عملية الحرق لحين وصولها درجة النضج ،وهذه المرحلة مهمة تعتمد على تنظيم صعود درجات الحرارة وتحكيم المنافذ والفتحات في الفرن ، وإبقاء الفتحة العليا في الفرن مفتوحة لغرض خروج الغازات والأبخرة الناتجة من عملية الحرق التي تنتج من تفاعل المواد والمركبات والاكاسيد داخل الأطيان المحروقة .

ان المياه المحاصرة بين جزيئات الطين وفراغاته سوف تتحرك لإيجاد منفذ للخروج أثناء الحرق، ولذلك فأننا لابد هنا ان نراعي الحرق البطيء وان يكون صعود درجات الحرارة بشكل تدريجي لأنه في هذه الحالة سوف يمنح جزيئات الماء الوقت الكافي للخروج من بين جزيئات الطينة وفراغاتها بشكل سهل وأمين ، ولكن اذا تم التسخين بدرجات حرارة عالية ولم يكن منتظما بل كان صعود درجات الحرارة سريعا فان ذلك يؤدي الى تسخين الطين بسرعة كبيرة ،وان الماء الموجود في الفراغات سوف يتحول الى بخار ماء سريعا في جسم الطينة أثناء الحرق ويؤدي ذلك الى توسيع المسافات بين جزيئات الطينة وبالتالي يؤدي الى حدوث التشققات والتشوهات وأحيانا يؤدي الى تهشم وتفجّر الشكل الفخاري فيذهب جهدنا سدىً.

يتطلب تعريض القطعة الطينية الى درجة حرارة تقارب درجة غليان الماء(100درجة مئوية) او أكثر بقليل أي بحدود(120درجة مئوية) وهي درجة مهمة ليتحرر جسم الطينة من هذه المياه التي تتبخر خارج جسم الطينة، ويمكن ان يسمى بـ (الماء الفيزياوي) أي الماء المضاف الى الطينة أثناء التحضير والتشكيل لإحداث اللدونة ، وتسمى عملية خروج الماء من جسم الطينة وتبخره بـ(تبخر الماء- Water Smoking) ، وهنا لابد من إخراجه من جسم الطينة لغرض الوصول الى مرحلة التصلب النهائي للمنتوج، وخروجه يؤدي الى ضغط كبير على جدران الشكل الطيني المصنوع، وعند خروجه سيؤدي الى انكماش وتقلص الجسم الطيني وتقارب الجزيئات الطينية.

ولكي يضمن الخزاف الوصول الى نماذج مفخورة بشكل جيد ومواصفات صحيحة ولتلافي الاخطاء لابد من وضع برنامج للحرق يتضمن رفع درجة الحرارة بمعدل (50 ^{o}C) في الساعة الى ان تصل درجة الحرارة الى درجة (700 ^{o}C) اذ يتم بعدها رفع معدل سرعة الحرق الى (100 ^{o}C) في الساعة لحين الوصول الى درجة الحرارة المطلوبة ، اذ يتم تثبيت الحرارة على هذه الدرجة مدة ساعة كفترة انضاج (Soaking Time) وبعد انتهاء الحرق يتم اطفاء الفرن وتركه ليبرد تماما لتخرج بعدها القطع من الفرن وتكون مفخورة وتسمى (البسكت).

ان درجة الحرارة اللازمة لفخر الطين مفتوحة لكثير من التفسير ، اذ يرى بعض الخزافين ان درجة حرارة واطئة لفخر الطين تتبعها حرارة عالية لحرق الزجاج توجد افضل صلة بين العمل والغشاء الزجاجي ،وقد تكون درجة فخر الطين واطئة الى الحد الذي تتم فيه عملية الاكسدة داخل الطين ، وقد تكون عالية الى حد نضج الطين ، ولان الجسم المفخور اذا وصل مرحلة حرق عالية تؤدي الى تصلبه وتزججه فسيصعب حينها وضع الزجاج عليه ، فتفضل درجات حرارة واطئة لفخر الطين.

تتراوح درجات فخر الطين الاعتيادية (كالأطيان الحمراء- وأطيان العراق) بين (890- 1000 ^{o}C)، ويجب رفع الحرارة ببطء وترك ثقوب الباب مفتوحة لتسمح لبخار الماء بالخروج حتى درجة (500 ^{o}C).

إن احد الإجراءات السليمة هو ان تسخن الفرن تماما حتى (100 ^{o}C) ، ثم تبقيه على درجة الحرارة الدنيا اللازمة حتى صباح اليوم التالي ، يتبع ذلك رفع درجة الحرارة على نحو مسيطر عليه طوال اليوم التالي حتى مرحلة النضوج ،ثم بعد الانتهاء يترك الفرن ليبرد وهو مقفل ، وهذه عملية يجب ان تأخذ على الاقل الوقت نفسه الذي استغرقته عملية رفع درجة حرارة الفخر.

ويجب الاخذ بنظر الاعتبار امران هما :.

- لا تحاول ان تفتح الفرن قبل هبوط درجة حرارته الى (200 ^{o}C) اذ ان ذلك يمكن ان يسبب مشاكل في الجسم الفخاري بسبب الصدمة الحرارية.

- يجب عدم لمس القطع المفخورة بكثرة ، ومن الافضل لفها بجريدة لابعاد الغبار عنها وتركها حتى تكون جاهزة للتزجيج.

من الممكن ان تلامس القطع الطينية بعضها البعض اثناء فخر الطين، وكذلك يمكن فخر بعض القطع في اكداس ، واحيانا توضع القطع الصغيرة داخل الكبيرة الا اذا كانت ثقيلة للغاية بالنسبة الى حجمها ،ومن الافضل فخر القطع وبالذات الاواني او الصحون وهي مستندة على شفتها (اي حافتها العليا) ، ويجب ان تفخر القطع ذات الاغطية واغطيتها باماكنها.

يجب ترتيب التعبئة بحيث تكون كثافة القطع على الرفوف وكذلك الرفوف منتظمة جدا داخل الفرن.

لابد ان نتأكد من اننا نستطيع ان نرى المخاريط (الحرارية) من خلال ثقب الفرن قبل ان تبدأ عملية الفخر،كما يجب رفع الرف الاول عن ارضية الفرن على مساند ووضع مساند الرفوف التالية عموديا على مساند التأسيس الاولى، ولابد من الانتباه وألا نضع القطع على الرفوف بحيث تلامس عناصر واسلاك الفرن ابدا.

(2-2) سلوكية المواد الخزفية أثناء الفخر.

من أهم مظاهر اختلاف شكل الجسم الخزفي في أثناء وبعد عملية الحرق هو تحول جسم الطينة من الجسم اللدن الذي تم تشكيله بدءا الى الجسم المتصلب بالجفاف ، ومن ثم الى تصلب الفخار بالحرارة المرتفعة وتلك خاصية تعمل على المحافظة على الفخاريات لآلاف السنين ،وهي عملة الفخر - البسكت - وهي تشمل التأثير الحراري الذي يؤدي الى تغيرات عديدة في تركيب وخواص الطين فيزيائيا وكيميائيا ، وفي اللون والملمس والتحمل والصلابة والمقاومة وفي الانكماش الطولي ،وهذه تتبع سلوكية الأطيان باختلاف أنواعها وكذلك المواد الداخلة في تركيبها ، ففي أثناء عملة الفخر يكون سلوك الأطيان بتعدد أنواعها تختلف عن المواد الصلبة الداخلة في تركيبها قبل التشكيل لإغراض معالجة اللدونة مثلا وتقليلها كالرمل والكروك.

ولإتمام عملية الجفاف ستبدأ هذه المواد بالتفاعل مع درجات الحرارة بدءا بفقد ماء اللدونة الفيزيائي واستمرارا بفقدان الماء الكيميائي وذلك يشكل قوة ضغط كبيرة على جدران العمل الفخاري

التي تتطلب صعوداً تدريجياً للحرارة المسلطة على العمل، وعندما تكون جدران العمل الخزفي سميكة تحتاج الى وقت اكبر لخروج الغازات والأبخرة وبخار الماء ،ويقل الوقت بالنسبة للأعمال ذات الجدران الرقيقة او الأقل سمكا التي تحتوي على مواد لزيادة مساميتها فتكون مدة وصولها للدرجة المطلوبة بفقدان الماء بحدود ساعتين أو أكثر وببطء شديد لان بخار الماء سيشكل ضغطا كبيرا على جدران العمل ،وكذلك الغازات المحصورة في الفراغات والفتحات داخل جدران العمل الفخاري التي ستتمدد حتما بالحرارة والتي تؤدي بالنهاية الى الانفجار في حال كانت الحرارة سريعة الصعود ،فنعتمد صعود الحرارة ببطء للحفاظ على سلامة العمل الفخاري.

يؤدي ارتفاع درجات الحرارة الى احتراق المواد والشوائب العالقة في الأطيان ومن هذه المواد العالقة أوراق الأشجار والأغصان الدقيقة والبكتريا والشوائب الأخرى العضوية وهذه المواد تبدأ بالاحتراق بعد درجة حرارة (120درجة مئوية)، وهذا احتراق لا يعد احتراقاً مهماً في جسم الطينة ولكنه احتراق عضوي ابتدائي في جسم الطينة في أثناء بدايات صعود درجات الحرارة ، ومن ثم يبدأ تغيير جديد ومهم في جسم الطينة ويسمى تغييرا كيميائيا وهو التغيير في مادة السيليكا التي تتغير الى عدد من الأشكال المختلفة وهذا أهم سلوك يمكن رصده في تغيرات شكل الطينة أثناء الحرق ويمكن ان يحدث ذلك بحدود درجة الحرارة من (220 -250درجة مئوية) ولغاية درجة(570درجة مئوية تقريبا) ، وهذا الانقلاب في أوجه السيليكا (SiO_2) يؤثر على سلوك أطيان ويؤدي ذلك الى عدم تجانس أسطح العمل الفخاري وذلك يتطلب الاناة في عملية الحرق لان تلك التقلبات من أهم تغيرات الجسم ومركباته في أثناء عملية الحرق ، التي بالتالي ستكون مسؤولة عن الإظهار النهائي لصفات المنتج الفخاري النهائية ، ويستدعي ذلك معالجة الحرارة بشكل منظم ومعرفة جدول صعودها وتنظيمه وكذلك ضبط عملية التبريد التي يجب ان تكون متأنية وبطيئة أيضا لان عملية التبريد أيضا مسؤولة عن إحداث تغيرات جديدة وتفاعلات في شكل السيليكا وتؤثر أيضا على سلامة العمل الفخاري من التهشم في أثناء تلك الانتقالات .

تتحد السليكا مع الاكاسيد القاعدية المتواجدة في الجسم الخزفي في اثناء عملية الحرق مكونة جسماً زجاجياً وهذا يكسب الجسم المنتج قوة وصلابة .

وإن كثيراً من الطينات تحتوي على الكالسيوم والمغنيسيوم والحديد في شكل كاربونات غير ثابتة مثل($CaCO_3$) وهذه الكاربونات غير ثابتة نوعا وتتحلل الى اكاسيد وتخرج ثاني اوكسيد

الكاربون في درجات حرارة من(^{o}C 1000-600) وتتحلل السلفات (الكبريتات) في مثل هذه الدرجات وتعطي ثاني اوكسيد الكبريت ومع ذلك فان كميات هذه المعادن الموجودة في الطينات تكون عادة صغيرة لدرجة ان هذه التفاعلات لاتحدث ضررا.

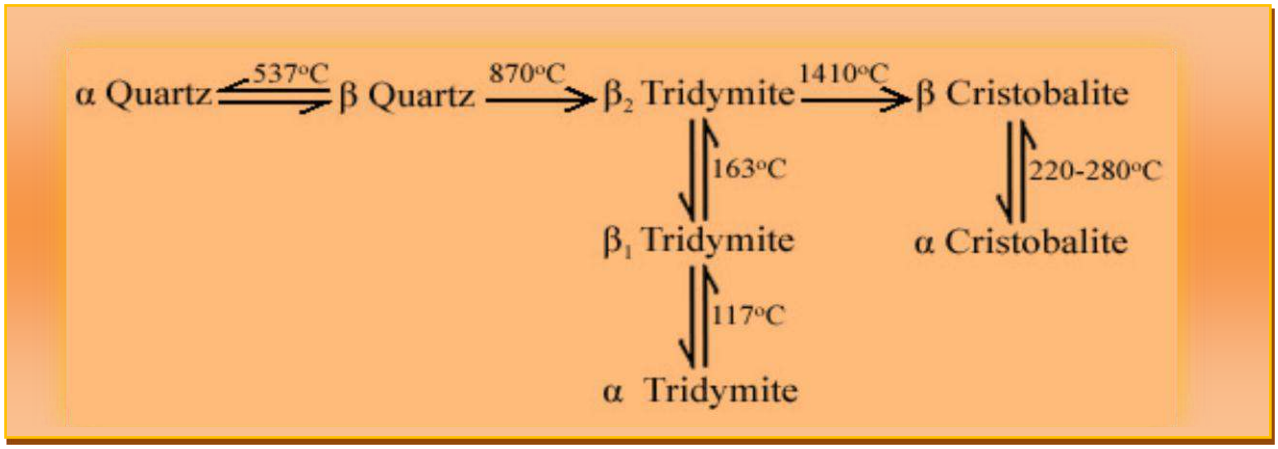
أن كثيراً من الطينات ومنها (الطين الكروي) التي تحتوي على المواد العضوية تسود اولا ثم بعدها تحترق عندما يصل الفرن الى درجات الحرارة الحمراء (درجات النضج) ، واذا كانت القطع سميكة تحترق المواد بها بسرعة اكثر من اللازم ، فان الاكسدة لاتتم ويبقى قلبها اسود اللون.

عندما تتحطم معادن الطينة يفقد الماء المتحد معها كيميائيا ويحدث في شكلها تغيير طفيف، ومع ذلك فعندما تصل الحرارة من(^{o}C 1000-950)فان المعادن يعود اليها تبلورها على شكل جزيئات ابرية الشكل تعرف بالمولايت ($Al_2O_3.2SiO_2$) ترقد في الجسم وفي درجات الحرارة العليا او عند وجود المصهرات فان هذه البلورات الابرية الشكل تعمل كثيرا على زيادة قوة الجسم الفخاري.

تعد السليكا من اهم المواد التي تدخل في تكوين الاطيان والزجاج، وهي تصاحب تغيرات مهمة مؤثرة في بنائية الجسم الفخاري ففي اثناء عملية الحرق تتحول السليكا من شكل الى اخر، ويعد الكوارتز الشكل المستقر للسليكا حتى درجة (870^{o}C) ، اذ يتحول بعدها الى (التريدمايت) ويستمر ما بين(^{o}C-870^{o}C 1475) ، ثم بعدها يتحول الى (الكرستوبلايت) وهي تتراوح بين (1475^{o}C– 1715^{o}C)، ليتحول بعدها الى الاطوار الزجاجية ، والاطوار الزجاجية هي حالة من التحول تنتقل من الشكل المتبلور الى الحالة غير المتبلورة للسليكا.

وعند عملية التبريد تعود السليكا الزجاجية غير المتبلورة الى حالتها البلورية مرة اخرى، وهنا تحدث تحولات وتغيرات من ضمنها تكسر اواصر التكافؤات ، ويمكن زيادة سرعة هذه التحولات من صيغة الى اخرى ، عندما تكون المواد ذات نعومة عالية، وان وجود مادة كاربونات الكالسيوم($CaCO_3$) مادة الجير تحفز على الانتقال الى حالة الكرستوبلايت ، بينما تساعد مركبات الحديد في تكوين التريدمايت.

وكذلك تحدث الانقلابات الصغيرة التي تؤثر على الطاقة دون التأثير في التركيب الاساسي وكالاتي:-



وهذا يعني ان الجسم الذي يقع عند درجة الحرارة الاقل هو(الفا-Alfa) وعندما تكون الحرارة اعلى فالجسم هنا يقع عند(بيتا-Beta).

وذلك سيظهر خواصا فيزيائية مختلفة ، وخاصة ما يتعلق بالتمدد الحراري ، اذ سيكون :-

التغير في الكوارتز من الفا الى بيتا تمددا طوليا 0.45%

التغير في الكرستوبلايت تمددا طوليا 1 %

التغير في التريديمايت تمددا طوليا 0.1%

وتأتي هذه الانقلابات سريعة ، وهذا يعني ان تغيرات الحجم ستكون سريعة عند درجات حرارة هذه الانقلابات وهذه التغيرات السريعة قد تؤدي إلى تغيرات في الحجم تؤدي الى التشقق في اثناء الحرق بارتفاع وانخفاض درجات الحرارة .

ويمكن توضيح التغيرات الحاصلة في الاطيان عند الحرق كالاتي:-

100-150 ^{o}C ⟵ فقدان ماء التشكل

200-300 ^{o}C ⟵ احتراق المواد العضوية في الاطيان

400-500 ^{o}C ⟵ احتراق شوائب الكبريتات

400-600 ^{o}C ⟵ فقدان الاواصر البنائية، اي فقدان الماء البلوري ،وهنا سيتحول الطين الى مادة غير لدنة ولا يمكن اعادته الى حالته عند خلطه مع الماء مرة ثانية ، فتتحول الكاؤولينات الى ميتاكاؤولينات

600-900 ^{o}C ⟵ تتحول الميتا كاؤولينات الى ثنائي اوكسيد السليكون (SiO_2) واوكسيد الالمنيوم (Al_2O_3)

500-980 ^{o}C ⟵ تتحلل الكاربونات وتتحرر على شكل غاز ثنائي اوكسيد الكربون(CO_2)

اكثر من 950 ^{o}C ⟵ يبدأ تكون المولايت (Mullite)

اكثر من 1400 ^{o}C ⟵ يتكون المولايت والكرستوبلايت(Cristobalite)

1650-1770 ^{o}C ⟵ ينصهر بعد تكون الطور الزجاجي

والمعادلات التالية يمكن أن ترصد التحولات في الأطيان عند درجات الحرق:-

$$2\,Al_2(OH)_4\,Si_2O_5 \xrightarrow{550^\circ C} 2\,Al_2Si_2O_7 + 4\,H_2O$$

"Kaolinite" "Meta Kaolin"

$$2\,Al_2Si_2O_7 \xrightarrow{980^\circ C} Al_4Si_3O_{12} + SiO_2$$

"spinel phase"

$$\downarrow$$

$$\xrightarrow{\approx 1150^\circ C} \frac{2}{3}\left[3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2\right] + \frac{5}{3}SiO_2$$

"Mullite" "Cristobalite"

3-2 التفاعلات الكيميائية أثناء عملية الفخر

تعد التفاعلات الكيميائية في داخل جسم الأطيان في أثناء عملية الحرق من أهم العمليات التي تحدد النتيجة النهائية لنجاح المنتوج المفخور ، وتلك التفاعلات تحدث داخل الفرن وفي أثناء ارتفاع درجات الحرارة التدريجي ومن ثم التبريد التدريجي بعد الوصول الى درجات الحرارة المطلوبة للنضج.

عندما تبدو الاوعية جافة تماما عند لمسها تكون جاهزة للفخر ،والغاية من الفخر هو احداث رد فعل كيميائي داخل الطينة يحولها الى مادة صلبة لا يمكن الغاؤها، وحتى الجاف منه يحتوي على كمية من الرطوبة والماء مرتبطة كيميائيا بالجزيئ، وفي اثناء عملية الفخر تطرد بقية الرطوبة وينكسر القيد الكيميائي فيتحرر الماء من الجسم.

وقد تأخذ التفاعلات الكيميائية داخل الفرن عدداً من المراحل:-

أولا: **إدخال القطع الى الفرن، اي بداية الارتفاع التدريجي للحرارة والوصول إلى درجة (100-120درجة مئوية) ،وذلك يعتبر بداية التسخين الاولي والحرق ،وفيه يبدأ الماء في تجاويف جدران العمل الفخاري بالتبخر اثر التسخين.**

ثانيا: **وفي هذه المرحلة يمكن الوصول الى درجات حرارة في أثناء صعود الفرن ،حيث يبدأ العمل الطيني بالتحول الى فخار (Pottery) وذلك يبدأ من درجة حرارة (350درجة مئوية) ويصل الى درجة حرارة(550 درجة مئوية) ،وهنا يظهر عدد من التغيرات المهمة في جسم الطينة وتلك التغيرات يصاحبها تغير في التركيب الكيميائي للمركبات الداخلة في تركيب الأطيان وفي اللون والتصلب ويحدث عند ذلك تقلص في حجم النموذج الفخاري ،وهي عملية غاية في الأهمية تؤثر على شكل المنتوج ،ويحدث ذلك التقلص عندما تبدأ جزيئات الماء الكيميائي بالتبخر من جسم الطينة ومركباتها.**

أما جزيئات الماء التي تدخل ضمن تركيب الأطيان على وفق الرمز الكيميائي لجزيئة الطين

($Al_2O_3.2SiO_2.2H_2O$) فهي تشكل نسبة بحدود (14%) من تركيب بلورة الطين، وفي هذه الدرجة تفقد بلورة الطين هذا الماء وهو ما يسمى الماء الكيميائي، فتفقد جزيئتي ماء ليتحول هنا الى صيغة كيميائية أخرى لا تحتوي على جزيئة الماء، بل مركب يحوي جزيءٍ من الالومينا وجزيئتي سليكا.

ثالثا: **وفي هذه المرحلة يبدأ حرق الكاربون والكبريت ،لان جميع الأطيان تحتوي على قدر من الكاربون والكبريت ، ويبدأ احتراق تلك المواد العضوية مابين درجة حرارة(300-800 درجة مئوية) وهنا لابد من ترك فتحات الفرن مفتوحة لغرض خروج الغازات والأبخرة من الأعلى في أثناء عملية احتراق تلك المواد ،ولابد من وجود الأوكسجين داخل جو الفرن بشكل متساو وبكمية ملائمة ،لان هذه المرحلة قابلة لحدوث الاختزال عندما يقل وجود الأوكسجين في جو الفرن ،وتحدث اخطاءٌ في عدم إتمام التأكسد وبقاء بعض المواد العضوية والكربونية داخل جسم الطينة ، وتلك الأخطاء تؤدي الى**

اسوداد جسم الطينة بآثار الكربون المترسب ،وأحيانا يؤثر على بعض الاكاسيد اللونية في جسم الأطيان كاوكسيد الحديد ، كما يؤدي ترسب الكاربون في جدران الجسم الطيني الى أحداث هشاشة في جسم النموذج الفخاري بعد الحرق ،فالمواد الكربونية تتصاعد من الفرن على شكل اكاسيد مثل (أول اوكسيد الكاربون CO) و (ثاني اوكسيد الكاربونCO_2) ، وكذلك الكبريت الذي يخرج مؤكسدا مثل (SO, SO_2, SO_3) والكبريت المؤكسد قد يتطلب درجات حرارة أعلى لحصوله على التأكسد تقارب (1100درجة مئوية) ،وكذلك مركبات الكلورايد والفلورايد التي تتأكسد بدورها لتنتج الغازات والأبخرة التي تطرح خارج الجسم الطيني .

***رابعا*: ويمكن تسميتها مرحلة الانصهارية وهي بداية التزجج(Vitrification)والنضج وهي مرحلة الاحمرار (HeatRed) ،وتلك المرحلة تبدأ بحدود درجة حرارة (700درجة مئوية) وهو تفاعل وتغيير كيميائي يحدث للجسم في أثناء الحرق ،عندما تصل الى مرحلة تبدأ فيها الاكاسيد والمركبات بالذوبان والانصهار ،وذلك يعتمد على نوع المركبات الداخلة في تركيب الأطيان، وتبدأ هذه المركبات بالانصهار وتتفاعل مع مكونات الأطيان ومع السليكا ومركبات الفلسبار فيتكون سائل متزجج ينصهر أكثر مع ازدياد درجات الحرارة، وهنا تحدث تغيرات في جسم الطينة لان هذا الطور الزجاجي الذي يبدأ بتقليل الفجوات والمسامات بين جزيئات الطين ، ليحصل التقارب بين الصفائح الطينية في مرحلة تعتبر مهمة في تغيير صفات الجسم الطيني وزيادة تصلبه ،وفي ازدياد نسبة تقلصه بسبب تقارب جزيئاته والتفاعل الانصهاري بين المكونات الطينية ،والأخرى غير الطينية الداخلة في تركيب الطينة ، ومع زيادة درجات الحرارة تزداد التغييرات في جسم الطينة كتقليل المسامية وتقلص الجسم الفخاري ، وبارتفاع درجات الحرارة ستزداد انصهارية المركبات لتصل الى مرحلة قد لا يمكن السيطرة عليها فتصبح شديدة اللزوجة والسيولة وتبدأ بالالتصاق والسيلان وعدم الانتظام بالشكل والحجم وتفقد بذلك صفاتها ، ويسمى عندئذ التزجج الذي يفقد صفاته الطينية الى الصفات الأخرى كمادة زجاجية.**

عندما يبدأ التزجج والانصهارية تبدأ جزيئات الطين بالتقارب والتصلب وتمتلئ المسافات بين جزيئاتها ويصل التقارب بينها الى مستوى التحامها معا تقريبا، وهذا الالتصاق والتقارب يؤدي الى زيادة صلابة وقوة الجسم الفخاري، ونظرا لمقاومة بعض المواد اي مقاومتها للانصهار الا في

درجات الحرارة العالية ، فان مثل هذه المواد تتجمع وتتشابك لكن دون حصول الانصهارية وتتجمع جزيئاتها دون تمييع وانصهار وهنا تحتاج الى زمن أطول وحرارة اعلى وتشبع حراري اكبر.

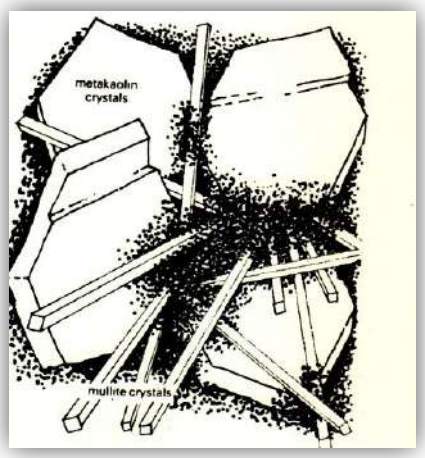
إنها عملية تدريجية يقوم خلالها اغلب المواد الموجودة بالجسم الطيني بالبدء بالذوبان كل حسب قدرته وسعة انصهاريته ، وتبدأ عملية ملء الفراغات بين الأجسام المنصهرة فضلا عن تقوية جسم الطينة والضغط باتجاه نضوجها المناسب.

***خامسا*: تحول السيلكا ،اذ تحتوي الأطيان على نسب من مادة السليكا كجزء من التركيب الاساسي لبلورة الطين، وكذلك وجود السليكا بصيغتها المفردة كأوكسيد(SiO_2) الذي يسمى عادة بـ(الكوارتز- Quartz) ، وهذه المادة تؤدي دورا مهما في عمليات التفاعل وانقلابات حالات تراكيب الجسم الطيني في أثناء الحرق ، وكذلك هناك مركب سليكي اخر وهو(الكرستوبالايت- Cristobalite) وهو تركيب مشابه لتركيب السيلكا الكوارتز، ويختلف عنه في البناء وتركيب بلورته ،ويمكن تسمية هذه الاختلافات (بوجوه تحول السيلكا)، الذي يؤثر عليه بشكل رئيسي ارتفاع وانخفاض درجات الحرارة ، اي التسخين والتبريد، ويحصل ذاتيا برفع وخفض درجات الحرارة ، فمثلا يتحول مركب الكرستوبلايت السليكي بتأثير الحرارة من (ألفا –Alpha) الوجه الأول إلى (بيتا –Beta) الوجه الثاني، ويتسلسل الى الثالث وغيره من المركبات.**

وهذه تحدث تأثيرا واضحا على التقلص وتمدد الأجسام وتحملها للصدمة الحرارية أثناء الفخر او فيما بعد ،بعد خروجها من الفرن .

اما مرحلة ظهور البلورات (وبالأخص بلورة المولايت مع السليكا الحرة) فتحصل عندما تبدأ درجة الحرارة بالارتفاع الى ما فوق درجات (1000درجة مئوية) ، وتبدأ بلورات الطين بالتفكك بفعل الحرارة ، فتتداخل مركباته كالسليكا والالومينا وتنصهر معا ، لتكون بلورات أبرية تسمى (مولايت Mullite) وهي سليكات الألمنيوم ورمزه($3Al2O_3.2SiO_2$)، ولابد ان ترتفع درجة الحرارة مدة كافية لتنشا تلك البلورات وتشكل نسيجاً بلورياً قوياً يربط أجزاء الطينة وتراكيبها ويمنحها القوة والصلابة والتحمل ،وهي أشبه ما تكون بالتجلد والحياكة لتمنح الجسم الطيني المفخور اكبر قدرة من القوة ، ومثل هذه المركبات أطيان البورسلين ، والأطيان عالية الحرارة (الحجرية) ،وهي تتميز بمواصفاتها الصلبة والقوية بعد الحرق ، وان هذه الانقلابات التركيبية والبلورية لا تظهر

الا مع أطيان ذات مقاومة عالية للانصهار ونقية ،شكل (2-1) يظهر تكون البلورات الابرية وتقارب الصفائح .



شكل (2-1) تكون البلورات وتقارب الجزيئات

سادسا: التبريد ، يمر الطين في أثناء الفخر بمرحلة مهمة جدا هي مرحلة التبريد وهنا يكون الانكماش المفاجئ لطور الـ (Cristobalite) الذي يمثل الشكل البلوري للسليكا ، فيبدأ بالتحول أثناء التبريد الى درجة (220 درجة مئوية) ، وقد تم العثور على هذا الطور من السليكا المتأثر بالحرارة في جميع أنواع الأطيان والنماذج ، ولذلك فانه يجب الحذر عند تبريد الفرن ولابد ان يكون تبريدا بطيئا حتى لا يؤثر على حالات انتقال السليكا وتطورها ، فتكون تلك الدرجات الحرجة مهمة ، ولابد من السيطرة عليها حتى لا تظهر لنا نماذج مليئة بالشقوق ومشوهة.

ان من المهم المعرفة والانتباه من أجل الوصول الى حرق الفخار بطريقة آمنة ، وان إجراءات التبريد تتطلب دقة وعناية وانتباهاً ، وبالأخص للتغيرات العملية المرافقة لها والمتصلة بها والى الوقت اللازم لإتمام هذه العملية، اذ لابد من ترك الأعمال داخل الفرن مدة كافية من الزمن تقارب مدة بقائه واشتغاله في أثناء صعود درجات الحرارة للحرق، لان ذلك يعطي نتائج أفضل ، واهم شيء هو الانتباه الى تجنب التقلص المفاجئ بتأثير الفارق بين جو الحرق داخل الفرن والجو خارجه في أثناء إخراج الأعمال .

من اهم الدرجات التي يجب على الخزاف الانتباه لها اثناء عملية التبريد هي ما بين درجة حرارة (^{o}C 280 ^{o}C-220) التي يتم خلالها أهم واشمل تحول عكسي تفاعلي في وجه السليكا وهو (الكرستوبلايت) والتي تمت عند التسخين ، والتي تعود ذاتيا مع خفض درجة الحرارة لمستوى درجة تغييرها الأول، وما يرافق ذلك من إجهاد داخلي يؤدي الى التصدع والتكسر في الجسم الفخاري.

سابعا: **تحتوي الأطيان الخزفية على مواد صاهرة كالصوديوم والبوتاسيوم تبدأ بالانصهار مع الازدياد في درجات الحرارة ، فهي تبدأ بالانصهار مع السليكا الحرة مكونة مركبات سليكيه كمنصهر زجاجي لزج ، يتداخل هذا المنصهر الزجاجي بين حبيبات الطين من خلال المسامات وهذا التداخل يؤدي الى حدوث تصلب والى الالتحام بشكل كتلة يكسبها الصلابة ويؤدي الى تقلصها نظرا لتقارب الحبيبات والتصاقها، ومع زيادة درجة حرارة الفخر يبدأ المنصهر المتكون بالازدياد وتقل اللزوجة حتى تصل الى مرحلة تنغلق معها كل المسامات ولكن لابد من الوصول الى درجة التصلب المثالية قبل حدوث الانصهار الكلي الذي يؤدي الى تشوه المنتج الفني او التواء جوانبه او انهياره بالكامل وتغيير مواصفاته مع ازدياد درجة الحرارة عن الحد المثالي المطلوب ، وهنا لابد من التوقف عند نقطة ،انه يجب مراعاة النقطة الحرجة التي تتناسب طرديا بين صلابة المنتج مع مساميته بالحدود المعتدلة التي لابد للخزاف ان يعرفها ، وتصبح من ثوابته العلمية بمعرفة خصوصية الأطيان ، والمواد الداخلة في تركيبها ، ومعرفة درجة حرارة كل طينة من الأطيان المستعملة ، ودرجة فخرها لتحقيق النموذج المثالي في عملية الفخر الصحيحة.**

تتميز الأطيان الترابية (Earthen were) على احتوائها على نسبة من البوتاسيوم او الصوديوم او كليهما معا بنسبة تتراوح بين (1-3%) من وزن الأطيان وتدخل كقيمة مقاومة الى جانب اوكسيد الالومينا كنسبة (25%) تصل درجة حرارته الى(^{o}C 1000) وترتفع اذا احتوى التركيب على الكالسيوم والمغنيسيوم، بينما الأطيان الحجرية (Stone were) وهي تحتوي نسبة اقل من الترابيات وأعلى من الالومينا تتطلب حرارة أعلى، أما الأطيان التي تحتوي على قلويات بهيئة فلسبار فان درجة حرارة(^{o}C1000)هي أول بوادر ظهور السائل الزجاجي فيها.

كما ان وجود اوكسيد الحديد (Fe) بحالة تأكسد مع تركيب الطين له تأثير كبير في تحديد درجة الصلابة ، والحديد ذو تأثير انصهاري وان نسبة(1.5%) او أكثر كافية لحدوث انصهار في الأطيان، وأحيانا تصل نسبتها الى حدود(5%) من وزن الطين وبالذات الأطيان الحمراء.

ان الحالة التأكسدية للحديد تحدد نوع التأثير والانصهارية للطين:

-اوكسيد الحديد الأحمر (Fe_2O_3) يمنح الطينة مقاومة حرارية إضافة الى اللون البني المحمر.

-اوكسيد الحديد الأسود (FeO) اذا كان بحالة التأكسد الثنائية فان تأثيره سيكون انصهاريا قويا في جسم الطينة وبالأخص في درجة(900 ^oC) تقريبا .

ان لجو الفرن اثراً واضحاً في تفاعلات الحديد، اذ لابد من ان يكون جو الفرن مؤكسدا ليستطيع الحديد من التفاعل مع الأوكسجين المتوفر في جو الفرن ويظهر اثره في الحالة التأكسدية للحديد ومن ثم في الحالة الانصهارية فيما بعد.

ويمكن توضيح تفاعلات الحديد في الأطيان وفق المعادلات أدناه:-

$$2FeO + O \longrightarrow Fe_2O_3$$

$$Fe_2O_3 + CO \longrightarrow 2FeO + CO_2$$

$$2Fe_2O_3 + S \longrightarrow 4FeO + SO_2$$

ان للأطيان المحروقة خاصية مهمة إضافة الى التصلب يمكن تقسيمها الى:-

- *التصلب إضافة إلى المرونة* ↓

أذا أحتوى تركيبها على الحديد + نسبة من الكالسيوم والمغنيسيوم

(كمركبات طبيعية غير طينية)

التصلب مع سهولة التصدع والتكسر↓

أذا أحتوى تركيبها على الحديد + نسبة من القلويات كالبوتاسيوم والصوديوم

لأنها تشكل عند زيادة درجات الحرارة والحرق منصهراً يتصف عند تصدعه بقدرة تحمل ميكانيكية وصدمة حرارية ضعيفة .

وإذن يمكن وصف التفاعلات الكيميائية التي يمر بها الجسم بالحرق كالآتي :-

1- **تتصاعد كمية من الماء الباقي في الجسم بعد تجفيفه من الرطوبة بدرجة حرارة(100 °C).**
2- **في درجة حرارة (200 °C) تطرد بقية الرطوبة المتحجرة في الطين بارتفاع درجة الحرارة، وبما ان حبيبات الطين تكون قد تماسكت تماما لابد ان لهذه المرحلة تسير ببطء.**
3- **تبدأ المعادن الطينية بالتحلل عند حوالي (500 °C - 450) اذ يتحرر الهيدروكسيد الموجود بالطينة على شكل بخار ماء، كما في المعادلة:-**

$$Al_2O_3.2SiO_2.2H_2O \rightarrow Al_2O_3.2SiO_2+2H_2O$$

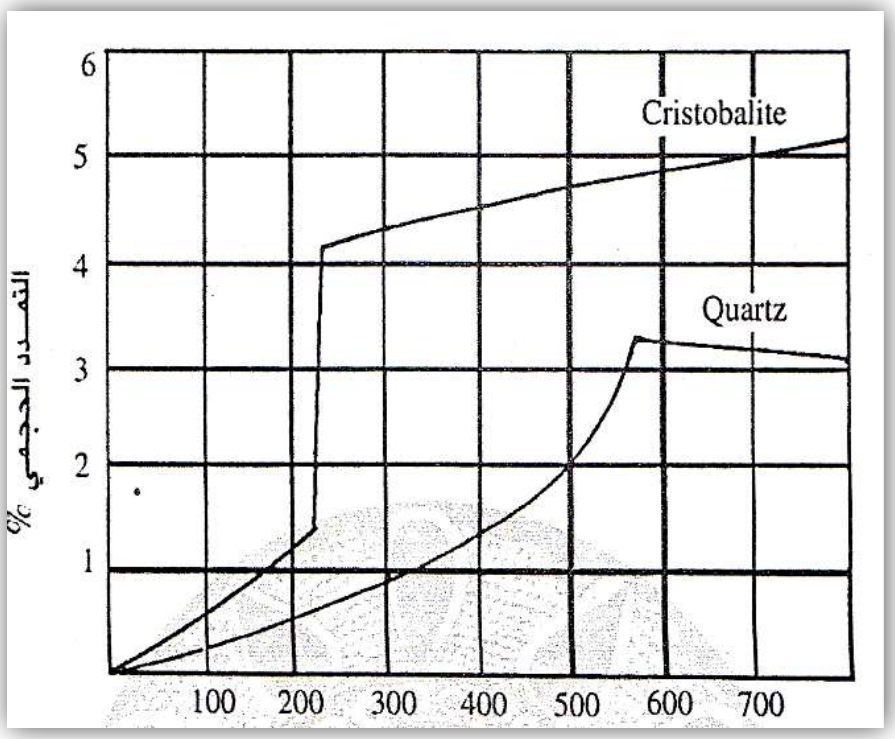
4- **تحترق المادة العضوية الموجودة بالجسم عند درجة حرارة (700 °C - 300) او أعلى من ذلك، فيتحرر الماء الكيميائي من جزيئ الطين ، ان اكبر كمية من الماء تكون قد تحررت في حوالي (500 °C) ،ولابد هنا ان يكون جو الفرن مؤكسدا لإتمام حرق الكربون الناتج وتحويله الى ثاني اوكسيد الكربون .**
5- **كما تحدث في هذه المرحلة عند درجة (570 °C) بعض التحولات البلورية فيتحول الكوارتز من حالة(A) الى حالة (B) اي تحولات (ألفا – بيتا) كوارتز وهذه عملية معكوسة مصحوبة بتمدد او تقلص مقداره (2%) وهذا التحول بحجم الكوارتز يمكن ان يخلق شدا ويحطم الجسم المفخور، فلذلك يتوجب تسخين وتبريد الفرن بالتدريج خلال درجة الحرارة هذه ،وان ارتفاع درجة الحرارة لابد ان لايتم الا بعد تحول الصوان الى كوارتز.**
6- **تبدأ عملية التزجج (Vitrification)عند درجة حرارة فوق(900 °C) واعتمادا على تركيب الجسم الخزفي ، اذ تتفاعل المادة المساعدة على الصهر مع مكوناته الأخرى لتكوين السائل**

الزجاجي، ثم تزداد كمية السائل بارتفاع درجات الحرارة وهنا ينكمش الجسم نتيجة تكوين السائل وتقل مساميته.

7- في هذه الدرجة تحتوي الاطيان على الشوائب العضوية وغير العضوية اضافة الى المواد المتعددة الموجودة على شكل اكاسيد كيمياوية ، وعند ارتفاع درجة الحرارة تحترق المواد العضوية ويتحرر الكاربون وتتأكسد المواد اللاعضوية وهذه العملية بحاجة الى الاوكسجين لتتم بطريقة صحيحة.

من هنا يتضح ان التفاعلات الكيميائية في أثناء الحرق يتحكم بها عدد من الظروف التي أحيانا يمكن ان تغير سلوكها او نتائجها ، منها نوع الأطيان المستخدمة والمواد الداخلة في تركيبها والتي لابد للخزاف من معرفتها والإطلاع عليها ومنها المواد المضافة للأطيان أثناء الاشتغال لان منها ما يرفع درجات الحرارة ومنها ما يساعد على الانصهار ويقلل درجات حرارة الحرق ومنها نوع الفرن وطريقة التحكم بالحرارة فيه وإحكام منافذه وطرق التهوية الصحيحة والمداخن المناسبة التي تؤثر على إنتاج النموذج الفخاري الجيد والمؤكسد ،كما ان الصعود المتدرج بدرجات الحرارة (أثناء صعود التسخين) وكذلك نزول الحرارة (أثناء التبريد) ومعرفة درجات الحرارة الحرجة التي يمكنها ان تؤثر على الأطيان ، وبالتالي فان عبورها وقلة الخبرة فيها يؤدي حتما الى فشل الحصول على نتائج جيدة ، كما ان الحرق الأول وهو(حرق الفخر) له أهمية خاصة لانه بمثابة المرحلة الأولى للحصول على إنتاج فخاري ناجح ، وتهيئته للمرحلة الأخرى ، وهي مرحلة الطلاء والتلوين(التزجيج) ، وتعتمد مرحلة التزجيج على نجاح مرحلة الفخر ، كما ان المدة الزمنية اللازمة للحرق مهمة أيضا لتحقيق التفاعلات الكيميائية وضمان نجاحها ، وذلك يتطلب عند اغلب الخزافين ممن لديه الخبرة في العمل ان يبقي النموذج الطيني الى مرحلة يمكن تسميها التشبع الحراري(Socking)[والتشبع الحراري هو عملية تثبيت درجة الحرارة عند درجة معينة يختارها الخزاف وهي إبقاء درجة الحرارة على الرقم الأخير الذي وصلت اليه الحرارة إذا رغب الخزاف بعمل التشبع لغرض الفائدة ، ويستمر إبقاء الدرجة عند هذا الحد مدة تتراوح من ربع الى نصف ساعة حسب خبرة الخزاف والمدة الملائمة لزيادة التفاعل والنضج، ومن ثم يستمر الخزاف برفع درجة الحرارة ويوقف تثبيتها والتشبع -هذا اذا كانت الحرارة المثبتة في وسط الاحتراق- وينهي عملية الحرق كاملة اذا كانت درجة تثبيت التشبع في نهاية عملية

الحرق] وليس فقط عملية الحرق بذاتها وهذه العملية يمكن اجراؤها في المدد التي تحتاج التفاعل الكيميائي الذي من شأنه ان يحدث تغييراً في جسم الطينة او مواصفاتها وكذلك يستخدمها الخزاف عند المراحل النهائية للحرق اي الدرجات النهائية لحرق المنتوج ،جدول (1-2).



جدول (1-2)يبين علاقة التمدد الحجمي بدرجات الحرارة





عمليات فخر قطع خزفية

(4-2) تأثير عملية الفخر على الخواص النهائية للمنتوج

عندما تكون الطينات مكونة بالطرق المعتادة فان جميعها ستتغير بعض صفاتها عند الجفاف ، وفي عملية الحرق بسبب خروج اغشية الماء الرقيقة من بين الحبيبات ، وكذلك حدوث عدد من التفاعلات الكيميائية والتغيرات والتحولات في الجسم الطيني ، مما يؤثر على تغيير صفاتها من لون ومسامية وتقلص وصلابة وحجم وملمس ، فمثلا بعملية الانكماش فانه كلما كانت الحبيبات دقيقة زادت كمية الماء الموجودة وبالتالي زاد الانكماش ، وتبعا لذلك فان طينات الحبيبات الناعمة تنكمش

بقدر كبير ، بينما تنكمش الكاؤولينات كبيرة الحبيبات بمقدار ضئيل ، كما يؤدي اضافة مزيج غير مرن (حبيبات من الطينة المحروقة) او الفلسبار الى تقليل انكماش الطينة ، وذلك يمكن ان نلحظه على سطح الطينة المحروقة التي تظهر كثافة الحبيبات فيها وتقارب جزيئاتها ووجود او عدم وجود الفراغات بين جزيئات الطين التي تظهر احيانا بالعين المجردة ، ويظهر كذلك الانكماش بتغير حجم المنتوج وتغيير ابعاده .

تختلف الخواص النهائية للنماذج بعد الحرق الاولي (الفخر) من ناحية المظهر الخارجي واللون ، ليتغير لونه حسب وجود الشوائب فيه اواكاسيد الحديد او غيرها ، وهذه من خواص المنتوج الطيني المهمة بعد الحرق ، كما ان الملمس يصبح اكثر مسامية وخشونة ، وذلك لاحتراق الشوائب وترك فراغات ومسامات فيه.

ان عملية الحرق (الفخر) من العمليات المهمة في الخزف ، اذ انها عملية تقوم بتغيير صفات المنتوج من جسم هش القوام سريع التكسر والتلف يتكون من مواد مختلفة ومعادن مثل الكاؤولينات والكوارتز ومواد صاهرة ليحولها الى جسم قوي و صلب ومقاوم ، فهي عملية تؤثر كثيرا على خواص الجسم الخزفي ،

ومن اهم التغيرات التي تحدث عند الحرق :-

- 1- خروج الماء الفيزياوي والكيمياوي
- 2- تحولات الكوارتز
- 3- حصول التلبد
- 4- ظهور مرحلة الطور الزجاجي عند ارتفاع الحرارة وعند التبريد

ان الطين يكتسب القوة والصلابة عند عملية الحرق والتي ترتبط بدرجة الحرارة الصحيحة والمدة الزمنية اللازمة لتكوين الاطيان المفخورة وتحولاتها والتي تتناسب مع نوع الطينة ومركباتها الداخلة والمواد المضافة ونوع وطريقة الحرق والتبريد، ومن خلال هذه التحولات ستظهر عدة تفاعلات

كيماوية وفيزياوية ، وناتج هذه التفاعلات سيحدد خواص المنتج مثل الكثافة والمسامية وامتصاص الماء ومقاومة الكسر والتقلص ، اذ انها ترتبط بالاطوار التي يمر بها الجسم في اثناء عملية الحرق.

ومن اهم الخواص الفيزياوية الناتجة من حرق المنتوج:-

- 1- اللون ، تحدث تغيرات لونية متنوعة نتيجة لتواجد عدد من المعادن المختلفة والاكاسيد الملونة في المركبات الطينية، التي تتغير درجاتها اللونية نسبة الى كميتها في الاطيان ودرجات حرارة الحرق.
- 2- تغيرات تظهر في الابعاد والملمس والتشوهات نتيجة التفاعلات والاستقرار النهائي للمنتوج بعد التبريد.
- 3- المسامية ، وتلك تكون المسامية الظاهرة على المنتوج ، التي تعمل على مقاومة التغيرات الحرارية والاجهادات بحساب قوة التحمل للتشققات والتحكم بامتصاص الماء.
- 4- نسبة امتصاص الماء التي تكون نتيجة مستوى ظهور المسامية في الجسم الخزفي، وتعتمد قيمة امتصاص الماء على كمية وحجم المسامات والفراغات المنتشرة في بدن الجسم الخزفي.

(5-2) النمـو البلـوري Crystalline

علم البلورات هو ذلك العلم الذي يختص بدراسة البلورات والمواد المتبلورة، والمعروف أن المواد المتبلورة توجد في الطبيعة إما في حالة حبيبات منفردة أو مجموعات ويمكن تعريف البلورة بأنها عبارة عن جسم صلب متجانس تحده أسطح مستوية تكونت بفعل عوامل طبيعية تحت ظروف مناسبة من الضغط والحرارة، والأسطح المستوية التي تحدد البلورة تعرف باسم أوجه البلورات.

والأوجه البلورية في الحقيقة هي تعبير وإظهار للترتيب الذري الداخلي للمادة المتبلورة والعملية التي تنتج لنا بلورات تعرف باسم عملية التبلور ، وهي عملية تحدث أمام أعيننا إذا تبخر ماء البحر أو المحاليل المشبعة ، أو برد مصهور ببطء أو تكثف غاز إلى الحالة الصلبة مباشرة، وفي البلاد الباردة يتجمد ماء المطر بسبب انخفاض درجة الحرارة وتتكون بلورات الثلج سداسية الشكل.

ويمكن الحصول على مادة بلورية من مادة غير بلورية فعند تسليط طاقة حرارية على مادة صلبة سوف تقوم هذه الطاقة بتحرير ذرات الجسم ومنحها طاقة حركية وبزيادة هذه الطاقة تزداد السعة إلى أن تصل الطاقة الحركية الممنوحة للذرات إلى الحد الذي تتمكن بها الذرة من التحرر من طاقة الأواصر الرابطة، فتتحول المادة هنا الى (الحالة السائلة) وهي منصهر المادة الصلبة (حيث يصبح ترتيب الذرات عشوائي) وهنا تكون المادة غير بلورية ، وتبدأ مرحلة جديدة عند تبريد هذا المنصهر، فستبدأ بإزالة الطاقة من الذرات وسيؤدي ذلك إلى تصلب المادة تدريجيًا مما يؤدي بدوره إلى انكماش المادة وتقارب ذراتها وصغر حجمها وزيادة كثافتها ، وعند تقارب الذرات فيما بينها تتكون بذرة التصلب على شكل تكتلات تتفرع منها تشكيلات شجيرية متصلبة تؤدي إلى تصلب المادة بشكل بلوري .

ان اختلاف درجة حرارة المنصهر من منطقة لأخرى سيؤدي الى تكون مناطق للتبلور مختلفة ، و إن معدل التبريد للمنصهر له تأثيرعلى إعادة انتظام الذرات ورصها ، فكلما كان معدل التبريد بطيئاً كلما كانت الفترة الممنوحة للذرات لكي تفقد طاقتها كبيرة ، ولذلك سوف تفقد الطاقة بالتدريج لتتراصف الذرات وتتخذ كثافة اكبر وحجم اقل ، وهنا يظهر الانتظام البلوري.

فإذا فحصنا أي بلورة منفردة من هذه البلورات نجد أن التي نمت بحرية دون عائق يحد من حريتها في النمو لها أسطح مستوية أو أوجه تكونت طبيعيا أثناء نمو البلورة ، أن الأسطح التي نراها مصقولة على قطعة من الزجاج ومرتبة في شكل هندسي جميل وتباع كجواهر مقلدة ، لا نسمي أوجهها بلورية كما أن الزجاج نفسه لا يسمى بلورة ، فبالإضافة إلى أن هذه الأسطح المستوية صناعية التكوين ، فإن المادة نفسها وهي الزجاج ينقصها البناء الذري الداخلي المرتب.

ويستخدم علم البلورات الآن باستمرار وباطراد مستمر في حل كثير من المشاكل الكيميائية والفيزيائية وفي دراسات وأبحاث التعدين والمواد الحرارية والأدوية والدراسات البيولوجية (الحيوية).

ويمكن تقسيم البلورات حسب استكمال الأوجه البلورية إلى ثلاثة أقسام:-

1- **بلورات كاملة الأوجه ، وذلك حينما تكون جميع الأوجه البلورية موجودة**

2- **ناقصة الأوجه ، وذلك حينما يكون جزء من الأوجه متكوناً فقط والباقي غير موجود**

3- **عديمة الأوجه ، وفي هذه الحالة تكون المادة المتبلورة عبارة عن حبيبات لا يحدها أوجه - بلورية ، وغالبا ما توجد هذه الحبيبات في هيئة مجموعات.**

وتشترك هذه الأنواع الثلاثة (كاملة الأوجه – ناقصة الأوجه – عديمة الأوجه) في أن لها بناءً ذريا داخليا منتظما، أو بمعنى آخر أن المواد المكونة لها سواء أكانت ذرات أم أيونات .. توجد مرتبة في نظام هندسي، وعلى هذا الأساس يتبين لنا أنه ليس من الضروري بتاتا ان نجد الأوجه البلورية تتبع المادة المتبلورة ، إذ تكون هذه الأوجه مرهونةً بالظروف المحيطة بالمادة المتبلورة أثناء عملية التبلور، وعلى ذلك فإننا نعرف كل مادة صلبة ذات بناء ذري داخلي منظم باسم مادة متبلورة ، فإذا كانت هذه المادة المتبلورة ذات أوجه طبيعية مرتبة في نظام هندسي ، ويمكن رؤية هذه الأوجه بواسطة العين المجردة ، أو عدسة مكبرة ، سميت باسم بلورة.

ويمكن ان نصف البناء الداخلي للبلورات على إنه نظام خاص تتصف به الأطيان والمعادن.

اذ تتميز المواد المتبلورة بحقيقة أساسية هي الترتيب المنتظم للذرات والأيونات التي تتكون منها ، وعلى هذا الأساس يجب أن نتصور البلورة كبنيان يتكون من وحدات غاية في الدقة تتكرر بانتظام في الأبعاد الثلاثة ، وأساس البناء البلوري هو التكرار ، الذي يمكن تشبيهه بتكرار رسم معين على ورق الزينة الذي يلصق على الحائط (ولكن مع فارق أنه في هذه الحالة الأخيرة يتكرر في بعدين فقط).

وتترتب هذه الوحدات المتشابهة عن نقاط منتظمة في الأبعاد الثلاثة بطريقة تجعل كل نقطة لها نفس الظروف المحيطة بالنقاط الأخرى ، ويتحدد هذا الترتيب بواسطة اتجاهاته الثلاثة والمسافات التي تتركز عندها النقاط في هذه الاتجاهات.

أن البلورة تتميز عن المادة المتبلورة في أنه لها أسطحا مستوية خارجية تعرف بالأوجه البلورية، ونجد أن الأوجه البلورية لها علاقة بالنظام الذري الداخلي، هذه العلاقة ناتجة من أن هذه

الأوجه البلورية تكونت نتيجة لهذا النظام الذري الداخلي ، والملاحظ أنه عندما ترتب الذرات نفسها في أي نظام – في أثناء نمو المادة المتبلورة قد يكون هناك عدد معين من السطوح المحتمل تكونها لتحدد البلورة الناتجة وهذا العدد يكون عادة قليلا ، وذلك لأن المستويات التي تشمل أكبر عدد من الذرات هي التي تحدد أمكنة الأوجه البلورية، أي أن الأوجه البلورية المحتمل تكونها (وفي المادة هي التي تتكون فعلا) ، هي التي تشمل أكبر عدد ممكن من الذرات.

ونقصد بكلمة بناء البلورة ترتيب الأيونات والمجموعات الأيونية في الفراغ وطبيعة الروابط الكهربائية التي تضم هذه الأيونات إلى بعضها البعض ، ومدى قوة هذه الروابط، ويمكن تشبيه الوحدات البنائية (الذرات والأيونات والحشود الأيونية) ، بقالب الطوب في بنيان حائط بينما تشبه الروابط الكهربية بين هذه الوحدات البنائية بالمونة التي تضم القوالب بعضها إلى بعض.

والبلورة عبارة عن جسم صلب متجانس يتميز بنمو الذرات بشكل مرتب في ثلاثة اتجاهات وتكون عادة محدودة بسطوح تسمى أوجه البلورة وهي انعكاس للترتيب الداخلي للبلورة، تظهر البلورات تماثلا مختلفا يتمثل بالتكرار للذرات ويتم دراسة التماثل بواسطة عناصر تسمى عناصر التماثل البلوري وهي مركز التماثل ومستوى التماثل و محاور الدوران ، إن دراسة الأوجه و الأسطح البلورية وعناصر التماثل بدقة قد يساعد على تحديد نوع بلورة المعدن .

وتختلف بلورة المعدن الواحد في الطبيعة من ناحية مظهرها ، فمنها الصغير ومنها الكبير ، ومنها المفلطح ومنها الطويل ، ومنها المسطح ومنها المستدير ، ومنها الابري اوالمنشوري، ونحن نجد أنه مهما اختلف المظهر فإن الزوايا بين الوجهين ثابتة ، وبما أن الترتيب الذري الداخلي ثابت في جميع بلورات المادة الواحدة ، لذلك كانت الأوجه البلورية المتكونة على جميع هذه البلورات ثابتة الاتجاه أيضا ، وبالتالي تكون الزوايا بينهما ثابتة.

ان المرحلة الأولية الهامة التي تلزم لنمو البلورات وهي عبارة عن شوائب تتواجد في المحاليل او المعادن والأطيان وتكون نقطة البداية ، اذ تبدأ عملية اتحاد العناصر المذابة في المحاليل تمشيا مع قوانين الطاقة في الطبيعة ، والتي تنص على (أن كل مادة تحاول الوصول إلى أقل قدر ممكن من الطاقة حتى تستطيع الاستقرار) .

إن العناصر المذابة أثناء عملية الحرق والانصهار توجد على شكل أيونات ذات طاقة عالية ولا تستطيع التخلص من هذه الطاقة إلا عن طريق الاتحاد ، و يتم التبلور في المركبات الطبيعية الممثلة بالعناصر الداخلة في تكوين الأطيان والمعادن أثناء عملية الحرق والتبريد، وتبدأ عملية اتحاد العناصر المختلفة إذا وصلت إلى مرحلة التشبع أو فوق التشبع ، ويتم ذلك عن طريق زيادة تركيز العناصر أو عن طريق زيادة الحرارة ثم التبريد، حيث أنه من المعروف أن المركبات الحارة لها القدرة على التركيز للعناصر أكثر من المركبات الباردة.

ان عملية التبخر والتكتل تؤدي بشكل تلقائي إلى زيادة التركيز، وكذلك اتحاد العناصر الكيميائية وتبلورها ثم ترسيبها سوف يعطي العديد من المعادن مثل الكربونات والكبريتات والهالوجينات والتي تمثل جزءا كبيرا من تركيب الأطيان الرسوبية .

عندما يبدأ انصهار المركبات الداخلة في بنية الجسم الطيني اثناء الحرق ، الذي يؤدي إلى ذوبان العناصر وتكوين أيونات مختلفة في درجات حرارة تبدأ من(700 لتصل إلى 1200 درجة مئوية) ، وعندما تبرد المواد المنصهرة تقل طاقتها وتبدأ هذه الأيونات بالاتحاد مرة أخرى لتكون بلورات مرة أخرى عن طريق التبريد.

إذا توفرت الظروف المناسبة من حيث الحيز والحرارة والضغط والتبريد المناسب ووفرة العناصر تتم عملية التبلور ، وتبدأ البلورات بالتشكل واعتمادا على كل هذه الظروف يمكن ملاحظة عدة أنواع من البلورات تقسم حسب حجمها إلى: -

بلورات خشنة، بلورات دقيقة، بلورات مجهرية، بلورات لا تشاهد إلا بالأشعة السينية. اعتمادا على الحيز الذي تنمو فيه البلورات تنمو حوافها وأوجها إلى أنواع منها ما يكون كامل الأوجه والحواف أو ناقص الأوجه أو عديم الأوجه.

يمكن أن تكون للمركب الواحد حالتان هي التبلور و غيرالتبلور ، مثل (SiO_2) فانه يكون عشوائياً في حالة زجاج السيليكا ومتبلوراً في الطبيعة في حالة الكوارتز ، وقد تتحول السيليكا إلى أطوار بلورية أثناء التسخين إلى التردمايت والكرستوبلايت كما لاحظنا سابقاً.

ان النمو البلوري الذي يحدث في الأطيان المحروقة في عملية الفخر يكون اقل من النمو البلوري الذي يحدث في أثناء عملية الحرق في مرحلة التزجيج ،اذ يحدث النمو البلوري في درجة حرارة معينة عندما تتحول فيها المواد المنصهرة بفعل الحرارة الى حالة سائلة ومن ثم أثناء عملية التبريد، فكلما كان التبريد بطيئا انتقل الى التصلب البلوري ، وهذا يحدث عند انتقال الجسم الطيني من حالة الجفاف الى حالة التصلب وحدوث تفاعلات كيميائية وتحولات في جسم الطينة أثناء الحرق وصولا الى درجات الحرارة العالية ،وفي أثناء عملية التبريد سوف تتكون أجسام بلورية تعمل على زيادة صلابة الجسم الفخاري وهو مصحوب باختلافات بالحجم نظرا لحدوث النمو البلوري.

يحتاج النمو البلوري في الجسم الطيني المحروق الى زيادة اللزوجة بين حبيبات الطين، ذلك ان التبلور يحدث في لزوجة معينة ،وتلك اللزوجة تحدث عند زيادة درجات الحرارة حيث يخضع الجسم الطيني في أثناء عملية فخره الى انصهارية مركباته بحدود خاصة محدثة لزوجة في مركبات الطين المفخور، وتعتبر اللزوجة العالية هي المناطق المناسبة للتبلور في أثناء الحرق والتبريد.

تستخدم الأشعة السينية في التعرف على المعادن دقيقة التبلور مثل المعادن الطينية وبقية المعادن ذات البلورات التي لا يمكن ملاحظتها مجهريا.

وهناك نوع من البلورات يتكون أثناء التبريد البطيء بين الجسم الطيني المفخور والزجاج ،وهي بلورات تنتقل من الجسم الفخاري الى الطبقة الزجاجية، ويتأثر الجسم الفخاري بهذه الطبقة المتبلورة اذ تتكون أواصر بين الجسم الفخاري والزجاج المطبق عليه ، وتتكون بلورات المولايت ، لان الجسم الفخاري يحتوي على الالومينا (Al_2O_3) اكثر من الزجاج نظرا لاحتواء الجسم على الالومينا بطبيعته التكوينية كمركب، وتتكون تلك البلورات طول مدة الحرق وفي أثناء مدة التشبع(Socking) وحتى في وقت التبريد، وتلك البلورات مهمة في الترابط الحاصل بين الجسم الفخاري والزجاج المطبق عليه.

ويمكن من خلال التحليل المعدني للأطيان أن يظهر المعادن الموجودة في الأطيان المحروقة ،ونوع المواد المؤثرة في الصهر ،وبهذا يعطي مؤشرا لسلوك هذه الأطيان في درجات الحرارة المختلفة .

ومن طرق تشخيص المعادن في الأطيان ، طريقة حيود الأشعة السينية (X.R.D) وتعتمد هذه الطريقة على انعكاس الأشعة السينية عن سطوح البلورات وتداخلها ، اذ ان المعادن لها تراكيب بلورية خاصة وذات ابعاد ثابتة ، وهذه البلورات مرصوفة على وفق نظام معين ، وعند تسليط الاشعة على هذه البلورات فانها تنحرف في زاوية خاصة تميز هذه البلورات عن غيرها من البلورات .

(6-2) النمو الحبيبي

ان النمو الحبيبي مصطلح يعني اختلاف القياس الحجمي للحبيبات وتكوينها عند حصول التغيرات في جسم الطينة وانتقالاتها وتحولاتها في اثناء الحرق، ان اختلاف قياس الحبيبات يؤثر على عملية امتصاص الضوء وانعكاسه، فاذا قل حجم الحبيبات ازداد تشتت الضوء وانعكاساته ، واذا كبر حجم الحبيبة فان الضوء ينعكس بمقدار اكبر، كما يؤثر النمو الحبيبي على قدرة الجسم الفخاري على الامتصاص وزيادة مساحة السطح .

يختلف النمو الحبيبي حسب نوع الاطيان ولزوجتها ولدونتها ، والمواد غير اللدنة الداخلة في تركيبها ، والمواد المضافة الاخرى والشوائب ، كما تؤثر درجات الحرارة على النمو الحبيبي للاطيان في اثناء عملية الفخر.

اذ ان زيادة المواد غير اللدنة في الجسم الطيني تؤثر على النمو الحجمي الحبيبي للاطيان عند عملية الحرق ، وتقل بقلة او عدم اضافة تلك المواد، اذ يتأثر الجسم الطيني وتتلاصق مركبات وصفائح الاطيان فيما بينها ليقل حجم الحبيبات ، يتأثر الحجم الحبيبي بزيادة اللدونة بالطين ، فكلما زادت اللدونة كلما كانت الحبيبات ادق، فسطوح الفخاريات المفتوحة والتي يقل تلاصق الصفائح فيها ،يكون النمو والحجم الحبيبي فيها اكبر .

كما ان لدرجات الحرارة تأثيراً على النمو الحبيبي في الاطيان ، ففي مرحلة انصهارية المركبات بارتفاع درجات الحرارة ، تبدأ الصفائح الطينية بالاقتراب وينخفض النمو الحبيبي لتقرب الاطيان من الاطوار الزجاجية وتكوين البلورات ،يتغير مدى التزجج بحسب نوع المعادن الطينية

والشوائب الموجودة في الطين، ان للحجم الحبيبي دوراً مؤثراً في عملية الانصهار، اذ ان الاختلاف في حجم الحبيبات ، او كبر النمو فيها يطيل من مدة ظهور الطور الزجاجي .

(7-2) اللـــون

ان احد اهم المتغيرات التي تظهر في الجسم الطيني بعد عملية الحرق (الفخر) ، هي التغيير في لون الاطيان، اذ ان التغيرات الفيزيائية والكيميائية التي حدثت اثناء التجفيف والحرق ، لها دور مهم في تغيير لون الاطيان.

وقد نلاحظ ان هناك اختلافاً بلون الاطيان قبل عملية الحرق اي في مراحل التحضير الاولى وبالتالي فان هذا الاختلاف ينسحب على تلك الاطيان بعملية الحرق الاولى الفخر (البسكت) ، فيختلف اللون قبل الحرق(الفخر) عن اللون بعد الحرق ، وذلك نتيجة تفاعل اكاسيد التلوين في مركبات الطين في اثناء الحرق ويكون ذلك واضحا بالعين المجردة.

ويعتمد لون الحرق الى حد كبير على كمية المعادن الحديدية ،فبعض الاطيان التي يكون اوكسيد الحديد معتدلا في تركيبها ستتحول من الالوان البنية الحمراء الى اللون الرصاصي الفاتح في اثناء التجفيف الاولي لتتحول فيما بعد الحرق الى اللون التبني المصفر، بينما تبقى الاطيان الحمراء احيانا محتفظة باللون الاحمر بعد الحرق ، هذا واذا كانت نسبة اوكسيد الحديد عالية في الطين فهو يتحول من الاحمر الداكن القرمزي الى الاحمر البني بعد الحرق ، أما الاطيان التي تحتوي على نسبة الالومينا او الكالسيوم وتقل بها نسبة الحديد فانها ستتحول من الالوان الرصاصية عند التحضير والتشكيل الى الالوان البيضاء بعد الفخر.

وللتوضيح وبشكل دقيق نجد ان الرواسب المتبقية من الكاؤولينات النقية ذات (0.5%) اوكسيد حديد تعطي لونا ناصع البياض، وان الكاؤولينات المترسبة ذات (0.7%) اوكسيد حديد تعطي لونا ابيض مصفراً باهتاً، وان الطينة الكروية ذات (1%) اوكسيد حديد تعطي بالفخر لونا ابيض مصفرا واضحا، وان طينة الخزف الحجري (Stone Were) ذات (2.5%)اوكسيد حديد

تعطي لونا رماديا او برتقاليا مصفرا ،وان الطينات الحمراء التي تحتوي على (7%) اوكسيد حديد تعطي لونا احمر عند الحرق.

ورغم ان كمية الحديد في الطينة له اكبر الاثر على لون الحرق الا ان بعض العوامل الاخرى تؤثر ايضا في اللون ، فمثلا يعمل الجير كمبيض لالوان الحديد الحمراء.

ومن معرفة الوان الاطيان بعد الفخر يستطيع الخزاف من هذه الخاصية التحكم بصناعته وانتاجه بما يوافق شروطه وشروط المنتوج، ان ذلك يؤثر حتما على المادة الزجاجية التي سيضعها الخزاف على جسم القطعة المفخورة ، والالوان التي سيضيفها لينتج جسما خزفيا لماعا ملونا.

ان لون جسم الطينة الناتج بعد الفخر سوف يتحكم باللون المطبق عليه في اثناء التزجيج ويتداخل معه ، فالوان التزجيج تتفاعل مع لون الطينة المفخورة، فاذا كانت تحتوي على نسبة عالية من الحديد فسوف يؤثر ذلك على المادة الزجاجية التي طليت على سطح المنتوج ويتغير اللون احيانا بوجود نسب عالية او ظاهرة من اوكسيد الحديد اوالمنغنيز او غيره من الاكاسيد الملونة التي تؤثر على لون الاطيان.

اما الاطيان التي تكون بلون ابيض بعد الفخر فانها بالتاكيد ستكون صالحة لانتاج الاجسام البيض على وجه الخصوص لانها ستكون قاعدة صالحة للعمل دون اضافات وستكون الالوان الزجاجية المطبقة عليها صريحة وجيدة ، وهذا يظهر عند فخر الاكسدة حيث وجود وفرة بالاوكسجين في جو الفخر، وفي الاغلب هذا يتحقق في الافران الكهربائية واحيانا في افران الوقود مع التحكم الجيد بنسبة الهواء والاوكسجين الداخل الى جو الفرن.

ويختلف اللون في الاطيان عالية الحرارة وكذلك الملمس ،فالاطيان عالية الحرارة تمتاز بسطوح خشنة وصلادة عالية والوان مائلة الى الرصاصي او التبني المحبب، وذلك لارتفاع درجات الحرارة وكمية المواد المقاومة في الاطيان.

اما في اطيان البورسلين عالية الحرارة فان اللون هنا سيكون ناتجا من حرق الفخر سيكون هو الحرق المزجج ، لان طبيعة صناعة خزف البورسلين تكون عملية في خطوة واحدة وعملية حرق واحدة، وهذه الخطوة تنتج الفخر والصلادة وبذات الوقت سيظهر ناتج ملون متزجج، وهذه خاصية يتمتع بهام منتوج البورسلين المصقول ذو السطوح الناعمة اللماعة الصقيلة.

اذن فان التاثيرات اللونية المختلفة الناتجة في الاطيان المفخورة هي من تأثير الشوائب والاكاسيد الملونة كأوكسيد الحديد والمنغنيز والتيتانيوم والالومينا وكذلك بعض الشوائب الاخرى.

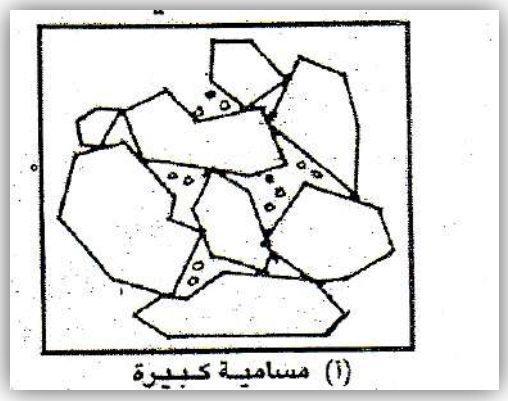
اما في حرق الاختزال فان التأثير في اللون هنا يخضع لعوامل خارجية تقوم بتغيير صفاته الشكلية واللونية والملمس ، اذ ان عملية الاختزال التي تعتمد سحب الاوكسجين من جو الفرن ومن الاطيان تعطي تأثيرا واضحا على لون الطينة بعد الحرق، ويكون التأثير الاول بظهور اللون الاسود او الرمادي ناتجاً من ترسب الكاربون في مسامات القطعة الفخارية وبذلك يظهر لونها باللون الغامق المسود والتأثير الثاني هو ناتج من التغير الحاصل في اوكسيد الحديد المختزل ضمن تركيب بعض الاطيان، الذي يعطي بعد الاختزال الوان البني او البني الفاتح المتدرج الى الرصاصي او الاسود.

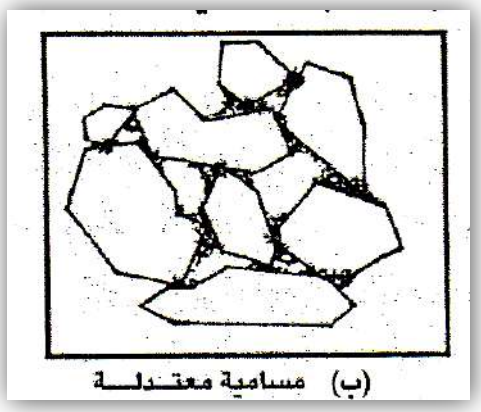
وتمتاز طينة الكاؤولين بكون لون طينتها بعد الحرق يميل الى البياض ، وذلك نسبة لقلة كمية الحديد فيه وبذلك فهو من افضل الاطيان في صناعة الخزف ، اما الاطيان الحمراء فهي تصبح ذات لون احمر بعد الحرق وذلك لارتفاع نسبة وجود الحديد فيها الذي يكسبها الوان متعددة منها البني او الاحمر او الرمادي المخضر والأسمر المصفر.

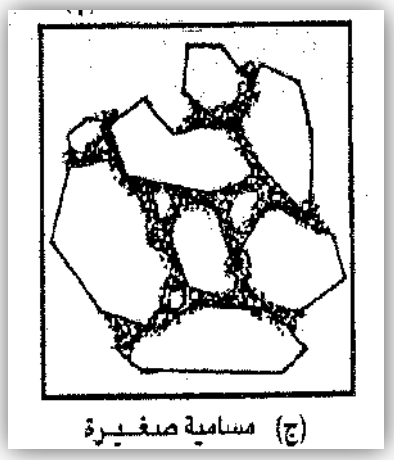
(8-2) المسامية Porosity

هي احدى الخصائص المهمة التي يتميز بها العمل الخزفي، وتتباين تلك المواصفات المسامية استنادا الى نوع الطين وطريقة تصنيعه، وتختلف ايضا في معدلها وشكلها قبل عملية الحرق وبعدها.

انها تمثل نسبة عدد الفراغات البينية بين حبيبات الطين والمواد الاخرى فيه ، وتقاس بوحدة المساحة السطحية ، فهي اذن تلك الخاصية التي تسمح بجفاف الاعمال الطينية من خلال السماح لتبخر جزيئات الماء ونفاذها من بين تلك المسامات المنتشرة على سطح النموذج الطيني بأمان دون ان يتعرض الشكل الى الانحناء او التشقق ،وتتنوع المسامية فمنها الكبيرة ومنها الصغيرة ومنها المتوسطة او المعتدلة ، شكل (2-2) .


(أ) مسامية كبيرة


(ب) مسامية معتدلة



الشكل (2-2) يمثل انواع المسامية

ان عملية حرق الاطيان تؤثر تأثيرا كبيرا على خواص هذه الاطيان وشكلها ،وذلك نتيجة التفاعلات التي تحدث في اثناء الحرق ، وتستمر وتتصاعد هذه التفاعلات مؤدية الى تقارب جزيئات الطين نتيجة انصهار المواد المساعدة على الصهر وتفاعلها مع باقي مركبات الطين فتنخفض المسامية نتيجة عملية التزجج (Vitrification)،وهذا ما يمنح الجسم صلابة وقوة بعد الحرق .

هناك عوامل تؤثر في نسبة المسامية مثل حجم الحبيبات والضغط المسلط على الاجسام في اثناء التشكيل ، وكذلك زيادة درجة حرارة الحرق ومدة الحرق ونسبة المواد المساعدة على الصهر الداخلة في تركيب الاطيان، وتزداد المسامية من خلال اضافة اطيان ذات مسامية عالية الى اخرى واطئة او اضافة الرمل او الطين المحروق او غيرها من المواد التي تفتح الاطيان وتزيد المسامية

ويمكن ان يظهر تأثير المسامية في الخواص الخارجية للأجسام ، فهي تؤثر في قابلية امتصاص الماء ، وفي تقبل الجسم الخزفي للطلاءات الزجاجية ، فالزجاج يتماسك ويتداخل مع الاجسام ذات المسامية العالية اكثر من الاجسام منخفضة المسامية ، وتقترن المسامية عند الفخر بحجم حبيبات الاطيان ،والمعادلة الاتية توضح ذلك :-

$$\text{مقدار الامتصاص \%} = \frac{\text{الوزن بعد الغمر بالماء - الوزن جاف}}{\text{الوزن جاف}} \times 100\ \%$$

اذ تتحدد مسامية الطينة بقياس كمية الماء الذي امتصته الطينة المحروقة بعد غليها بالماء لمدة ساعة واحدة وتركها منغمسة في الماء لمدة اربع وعشرين ساعة، فمثلا اذا كان هناك طبق فخاري غير مطلي يزن 196 غراما وهو جاف ،ويزن 230 غرام بعد معالجته بالماء وبالطريقة السابقة، فان مقدار الامتصاص يكون:-

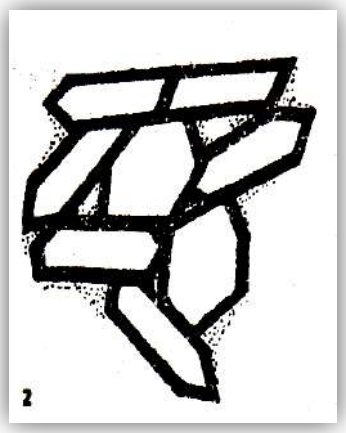
$$\text{نسبة الامتصاص} = \frac{196-230}{196} \times 100\% = \frac{34}{196} \times 100\% = 17.35\ \%$$

وقيمة الامتصاص مهمة للحكم على صلاحية طينة ما لغرض معين ، والطينات التي تتقلص مساماتها بالحرق تساعد على انقاص درجة حرارة الحرق المطلوبة ، بينما تتجه الاطيان التي تنفتح مساماتها عند الحرق الى زيادة حرارة الحرق .

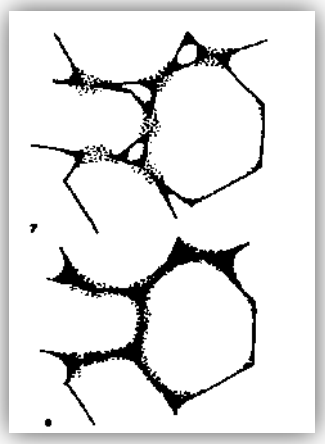
ويمكن اعتبار المسامية هي قابلية الجسم المحروق على امتصاص الماء، ويعتمد على مطاطية الطينة، اذ تنخفض المسامية عندما تكون ذرات الطين صغيرة ومتجانسة وهنا تكون مطاطيتها عالية ، وبازدياد الفراغات بين جزيئات الطينة وما يدخل في تركيبها من حبيبات (والذي له تأثير على المسامية) تكون الطينة ذات مطاطية قليلة ، وذراتها غير منتظمة ،وتتغير المسامية حسب الحرق ونوعية المواد المضافة للطينة ، وتعمل المسامية على تقليل صلابة الطينة وتحملها

تعمل السليكا المنصهرة عند درجات الحرارة العالية كمادة تشحيم lubricant بين الحبيبات مؤدية إلى تحركها معا ويؤدى التوتر السطحي surface tension إلى جعل الحبيبات تعيد ترتيب نفسها بتأثير القوى الشعرية وإعادة التبلور، شكل (2-3).

وكلما زادت درجات الحرارة كلما أصبحت المسام أكثر دائرية بسبب ملء المسام الصغيرة بالسليكا المنصهرة ، شكل (2-4).



شكل (2-3) حبيبات الطين ومساميتها

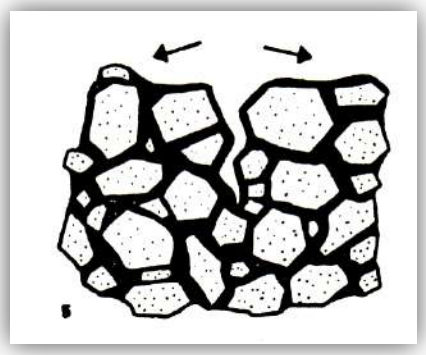


شكل (2-4) تدرج ملء المسامات في اثناء الفخر

ويعد استخدام المواد العضوية عاملا مساعدا في زيادة نسبة المسام بالبدن ، وفقدانه قد يؤدي الى حدوث شروخ دقيقة في أثناء التقلص والانكماش .

(9-2) التقلص shrinkage

هو نتيجة فقدان الجسم الخزفي للماء في اثناء عمليتي الجفاف والحرق ،وتختلف نسبة التقلص وتعزى الى عدة عوامل منها نوع الطين ودرجة حرارة الحرق ونسبة اضافة المواد غير اللدنة ، ان التقلص في اثناء الحرق يعتبر من المراحل الخطرة في صناعة الخزف لان الزيادة في التقلص او التقلص غير المنتظم قد يؤدي الى الاجهاد وتشقق سطح العمل الفخاري، شكل (2-5).



شكل (2-5)تقلص غير منتظم يؤدي الى تشقق الجدار

تنكمش جميع الاجسام الطينية في اثناء عملية الحرق وتتباين نسبة التقلص بين الاجسام الطينية ونوعية الخزف ، فمثلا الاطيان الخشنة ذات المسامية العالية كالأطيان الحمراء واطئة الحرارة والاطيان المضاف لها الرمل والاطيان التي تعرف باسم تيراكوتا (الاطيان الفخارية الحمراء) فان نسبة تقلصها تصل الى(4%) تقريبا ، بينما اطيان البورسلين ذات الاطيان المزججة والتي تحترق حتى التزجيج فان نسبة تقلصها تصل الى حدود (11%) من طولها ، ولذا عندما نريد انهاء قطعة بمقاس محدد يجب ان نعمل حساباً لنسبة التقلص والانكماش فيها عند تشكيلها.

يختلف الانكماش والتقلص في اثناء الحرق كثيرا بين مختلف انواع الاطيان ففي بعضها يكون التقلص كبيرا لدرجة تحدث التشقق وفي البعض الاخر يكون قليلا لدرجة يمكن اهمالها ولذا يجب على الخزاف الانتباه ومعرفة نوعية الاطيان المستخدمة ، والتي تناسب عمله والمتوفرة ، ولابد ان يعرف كيف يعالج تلك الاطيان لإيجاد طينة جيدة ضمن مواصفات مناسبة للتشكيل .

يستمر التقلص اثناء الفخر ويصل اعتياديا الى مجموع كلي بين (12 - 15 %) عند النضج، وقد يصل تقلص الفخر الى (12 %) فيصل التقلص الكلي مستوى عاليا مقداره (25%) احيانا .

ويتناقص التقلص مع اقتراب نضج الطين ولهذا السبب فكل واحدة من بلاطات الاختبار تفخر الى درجة حرارة متزايدة مقررة مسبقا لمعرفة تطور الطين نحو الانصهار . يتكون الجسم الطيني عادة عندما يكون جافا من ذرات صغيرة متجمعة بأشكال عنقودية ذات فتحات او مسام فيما بينها ويحتوي السنتمتر المكعب من الطين على حوالي($0.6\ cm^3$) من الطين و ($0.4\ cm^3$) من الهواء في المسامات وعند الحرق فان هذا السنتمتر المكعب من الطين تتحول مساماته الى الصفر بتأثير الحرارة وعند خروج نسبة الهواء في اثناء تمدده وخروجه من جسم الطينة بالحرارة او بخار الماء فتنكمش وتتقلص الاطيان وتلتصق ببعضها دون فراغات وخاصة عند عدم اضافة اي مادة غير لدنة اليه وتكون هذه نسبة التقلص الظاهرة في الاطيان ، شكل (2-6) .



(أ) (ب) (ج)

شكل (2-6) مراحل التقلص في الاطيان في اثناء الحرق

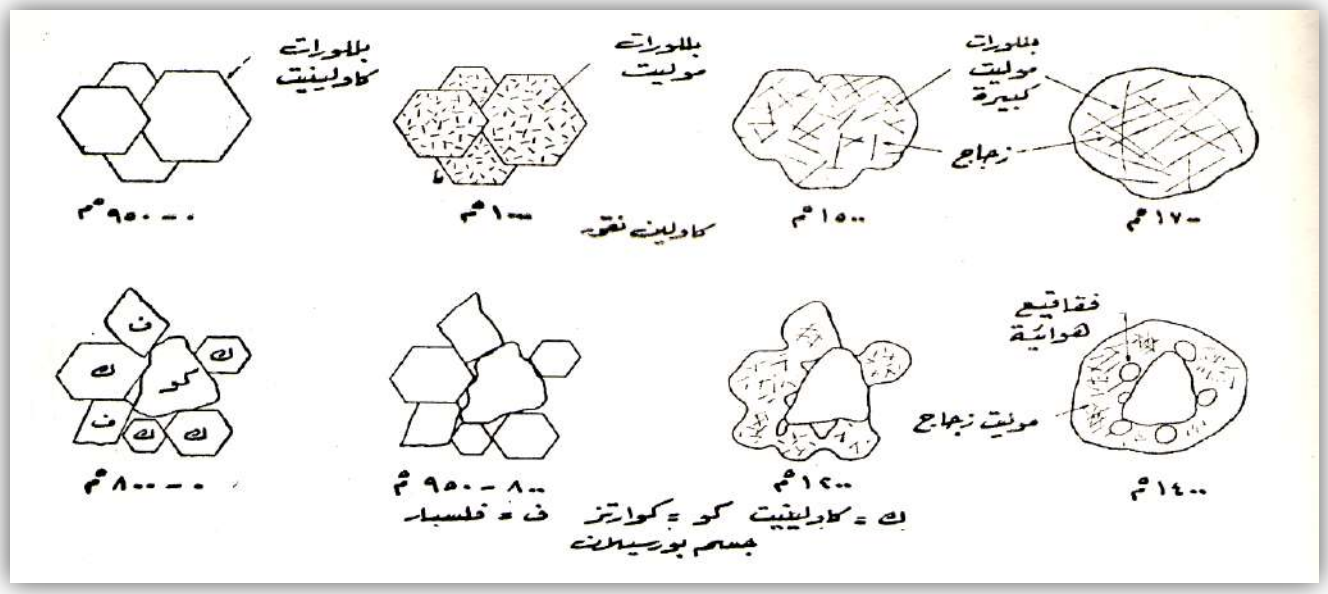
ومن الاسباب الرئيسية لانكماش وتقلص الطين اثناء الحرق :-

1- نقص حجم الجسم بسبب طرد الماء وثاني اوكسيد الكاربون ، وهذا النقص يؤدي الى تقارب جزيئات الطين وفقدان جزئ من حجمه الذي شكل به ويبدو بحجم جديد بعد الحرق.

2- بسبب التجاذب الشعري لبلورات الزجاج وما يترتب عليه من طرد الهواء من المسامات .

وتتقلص الطينات الخزفية بالطريقة نفسها التي يتقلص بها الطين العادي الى حد كبير ولكن بما انها تحتوي على مواد غير لدنة وذرات اكبر من الرمل او الطين المحروق(الكروك)الذي يكون ثابتاً حجما ، ولايقوم بأي عملية تقلص ، تعمل كهيكل لها يمسك بين جزيئات الطين ، وهنا فان التقلص لا يكون مثل تقلص الطين العادي ،ومن المرغوب فيه ان نجعل انكماش او تقلص الاطيان في اثناء الحرق اقل مايمكن لان ذلك من اساسيات نجاح طينة الخزاف وعمله ودليل على سيطرته على عملية التشكيل والحرق ، ولكن الذي لامفر منه هو ان التقلص لابد ان يحدث ولو بنسب قليلة احيانا .

ولكن في الأجسام الطينية البورسلينية او ذات التزجج ، فان نسبة التقلص عالية جدا تقارب احيانا(10%الى 14%) تقريبا من الجسم الطيني ، ذلك لتقارب الجزيئات كثيرا في اثناء عملية الحرق وحدوث انصهار وتكتل بين جزيئات الطين المزجج ، شكل (2-7).



شكل (2-7) التغيرات المكروسكوبية الحاصلة اثناء الفخر

ان نتيجة تقارب الجزيئات في الاطيان خلال الحرق يحدث تقلصاً في حجم وابعاد الجسم او النموذج ، نتيجة حدوث التفاعلات بين المواد المساعدة على الصهر ومركبات الطين الاخرى مكونة الطور الزجاجي الذي يثبت على حجمه بعد التبريد .

ويمكن استخراج نسبة التقلص الناتجة عن الحرق ،اذ يتم قياس ابعاد النموذج من خلال تطبيق القانون الاتي :-

$$\text{نسبة التقلص بعد الحرق} = \frac{\text{طول النموذج الجاف - طول النموذج المحروق}}{\text{طول النموذج الجاف}} \times 100\ \%$$

ان حرق الاجسام الطينية في درجات الحرارة العالية تساعد على حدوث تفاعلات اثناء عملية الحرق ، تؤدي الى تقارب جزيئات الطين فيحدث تقلص في حجم الجسم ، ويعتمد هذا التقلص على نوع وطبيعة المواد الداخلة في تركيب الجسم ،ان هذه التفاعلات تؤدي الى تكون الاطوار الزجاجية عند ارتفاع درجات الحرارة ، وهذا يؤدي الى شد جزيئات الطينة التي نتيجتها حدوث الشد بين جزيئات الطينة فتؤدي الى التقلص ، وعند التبريد يتجمد الطور الزجاجي ويبقى الجسم محافظا على حجمه الجديد مع متانة عالية وتسمى بعملية التزجج)(Vitrification.

اذن صار لابد من السيطرة على تقلص الاجسام ، وبالاخص الاجسام التي تتعرض لشد عال اثناء الفخر ، لان عملية الشد قد تسبب تشوهات اذا لم تحسب عمليات التقلص والنسب الصحيحة، واذا كانت نسبة التقلص عالية في الطين فيجب خفضها باضافة الطين المحروق او الرمل او اي مادة اخرى لاتتقلص للحصول على نتائج جيدة.

(2-10) مشاكل وعيوب عملية الفخر وطريقة المعالجة .

يحاول الخزاف دائما ان يتقن عمله لان ذلك دليل نجاحه وإتمام جمالية نماذجه التي بذل فيها جهدا ووقتا وفنا، ولان الممارسات العملية غالباً ما يتخللها هفوات وسهو وعدم معرفة أحياناً أخرى مما يشكل فشلاً في إنهاء العمل الفني ولذا لابد من رصد الأخطاء التي قد يتعرض لها الخزاف في أثناء عملية الفخر وتلافي ما يمكن ان يشكل خطرا على النماذج وملاحظة الأخطاء والاستفادة من التجريب لأجل النجاح .

يحدث التلف للقطع في أثناء عملية التصنيع حيث ان لاختيار المواد الخام دوراً كبيراً فى الوقاية من التلف ، فالاطيان المستخدمة في صناعة الفخار احيانا تتميز بعدم تجانس مكوناتها المعدنية والكيميائية ، لكونها تكونت جيولوجيا من عمليات التجوية للعديد من المعادن والصخور النارية

وبعض الصخور المتحولة أي أنهـا تكونت من مصادر صخرية مختلفـة تختلف في خواصها الطبيعية والكيميائية والحرارية ، لاختلاف ظروف تكوينها سواء الميكانيكية منها أوالفيزوكيميائية أو العضوية، و كذلك اختلاف بيئات ترسيبها ، ويؤدي ذلك إلي اختلاف خواصه

وتحتوي الاطيان على العديد من المعادن الأولية مثل
الكـوارتز Quartzوالفلسبار Feldspars والميكا Mica والأوليفين Olivine والبيروكسين pyroxene وبعض المعادن الأخرى ذات التركيب المعدني المعقد ، والطينات متوفرة في كل مكان على سطح الأرض، إلا أنها تختلف في تركيبها المعدني والكيميائي، وكذلك في خواصها الطبيعية والكيميائية والحرارية ، حيث يلعب التركيب المعدني للاطيان المستخدمة في صناعة الفخار دوراً هاماً في تحديد درجة التلف من عدمه.

فكلما كانت الاطيان متجانسة كلما كان الأثر الفخاري أكثر قدرة على مقاومة عوامل التلف ، وكلما كان تغير متجانسة ، كلما كانت المشغولات الفخارية اكثرعرضه للتلف، وتتوقف درجة جودة المنتج الفخاري على مدى نجاح الصانع في تنقية الطين، وإزالة الشوائب وفي حالة إهمال الصانع في هذه المرحلة فإن المشغولات الطينية سوف تحتوي على العديد من الشوائب التي ستكون بمثابة بؤر لجذب عوامل التلف .وسوف تتعرض للتشقق والتشرخ والالتواء في أثناء مراحل التجفيف والحرق والتلف في أثناء مدة الدفن في التربة كأن يضيف إليها بعض المواد المالئة ومن أهم المواد المالئة التي تضاف الرمل الناعم والتبن المقرط وروث البهائم ومسحوق الفخار والطوب الأحمر و مسحوق الحجر الجيري ، فاذا كانت نسب مكونات الطين والاضافات غير دقيقة فسوف يحدث تبخر سريع أثناء التجفيف ينجم عنه انكماش غير مرغوب فيه فيحدث تشقق أواعوجاج للفخار . والزيادة الكبيرة في تلك المواد المضافة قد تسبب نقص لدونة الاطيان المستخدمة في صناعة الفخار إلى الدرجة التي تجعلها هزيلة ضعيفة غير متماسكة في أثناء التشغيل ،وعدم التخلص من الفقاقيع الهوائية سوف يعرض الاواني الطينية للتشقق في أثناء مرحلتي التجفيف والحرق وسيزيد ذلك من مسامية الجسم الفخاري . كما أن الحبيبات الكبيرة تشوه مظهر السطح في أثناء عملية التشكيل أو المعالجات السطحية ، ويصبح البدن مليئاً بالجيوب أو النتوءات (Pits) ، فاختلاف المواد المضافة قد ينجم عنها مظاهر تلف مختلفة والتيقد تؤدي إلى تحطم الجسم أو تشرخه أو التوائه في أثناء التجفيف أو الحرق، نتيجة عدم تجانس المادة الخام واحتوائها على العديد من الشوائب والمواد المضافة الخشنة.

إذا احتوى البدن على كمية غير كافية من المادة المالئة (filler) يؤدى ذلك إلى حدوث جفاف سريع وينتج عنه شروخ وقد يؤدي ذلك أيضا إلى تهشم البدن.

أما بالنسبة للبدن الذى يتميز بمحتوى مرتفع جدا من الكوارتز وتم حرقه عند درجة حرارة منخفضة فإن الكوارتز لا يكتمل إنصهاره مما يسبب تلف ناجم عن الضغوط الناتجة عن تمدده وانكماشه ،وبالتالى التعرض للالتواء والانكماش عند التجفيف بالإضافة إلى جعله أكثر صلابة وهو ما يؤدي إلى حدوث انكماش حراري كبير . كما أن ارتفاع مستوى السليكا يؤدي إلى زيادة المسامية وذلك بسبب حدوث تمدد لحبيبات الرمل نتيجة الحرارة مما يؤدي إلى تغيرات بلورية ، ويحدث التغير المفاجئ عند درجات حرارة ثابتة محدثا فراغاً حول كل حبيبة من الحبيبات مؤديا إلى نوع من المسامية المستمرة .

ومما سبق يتضح الدور الذى تلعبه المكونات المعدنية فى أحداث مظاهر تلف مختلفة تعتمد على سلوك هذه المكونات في أثناء مراحل الصناعة المختلفة ، وخاصة عملية الحرق ويؤدى ذلك إلى حدوث مظاهر تلف داخلية ، ولا يمكن إغفال التلف الذى يحدث في أثناء مرحلة التشكيل والتجفيف والحرق بعد ذلك ، حيث يحدث تحول لمادة الطين من مادة لدنة إلى مادة صلبة سهلة الكسر محملة بانفعالات داخلية كبيرة تؤدي مع الزمن إلى حدوث تشققات وشروخ . فهناك عدد كبير من الأواني المشكلة بطريقة القرص لم ينجح الصانع في إزالة الطين الزائد منها كليا ، مما أدى إلى عدم رقة الجدران وعدم تجانسها وسوف ينتج عنه حدوث تشقق أو تشرخ أو التواء في أثناء مرحلتي التجفيف أو الحرق،تحدث تغيرات كثيرة في شكل وابعاد الجسم نتيجة الحرق، وهذه الحالة تحدث لأسباب عديدة قد يكون منها التباين الكبير بين في معاملي التمدد والتقلص بين طبقات الطينة في اثناء الحرق او التبريد اذ يؤدي هذا الاختلاف الى حدوث التشوه في الجسم، او زيادة الانصهار في الجسم بشكل كبير وغير طبيعي ، وذلك نتيجة زيادة نسبة المواد الصاهرة الموجودة او المضافة ضمن خلطات الاطيان .

وهناك أسباب يمكن إجمالها بعدد من النقاط يمكن ان تكون من أهم ما يتعرض له العمل الفني من تأثير في أثناء عملية الفخر ومن أهمها :-

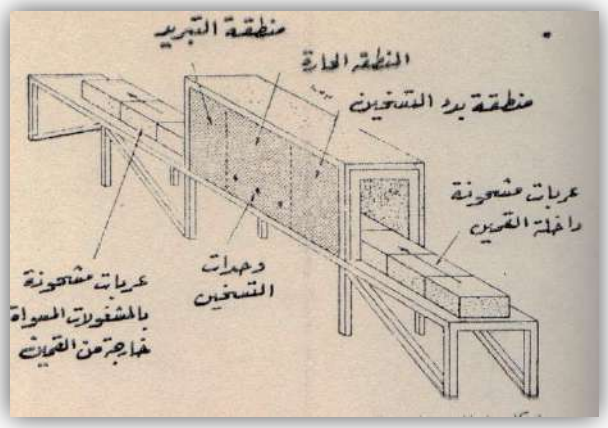
اولا _ التجفيف قبل الفخر:

ان عملية التجفيف قبل الفخر لها دور لان ذلك ينعكس على حدوث عيوب الفخر في أثناء عملية الحرق لوجود عيوب سابقة في أثناء وقت التجفيف غير ظاهرة أحيانا، وستظهر وتزداد عند الحرق ، فلو كان هناك شرخً قد بدا ينمو قبل الفخر حتى وان كان بسيطا فسيبدأ بالازدياد وسيكبر ويبدأ بالانفتاح أكثر لتأثير الحرارة التي تكون في مرحلة ما مكونة لبلورات ابرية وتلك البلورات عند شدة التوتر والشد والانصهار سوف تزيد من شد جزيئات الطين ،وذلك يؤدي الى التجاذب بين الجزيئات وعند وجود شرخ سابق ستكون منطقة قطع تبدأ منها الجزيئات بالشد الى الداخل وبذلك سيزداد التوتر معمقا من منطقة الشرخ ليكون اكبر بعد عملية الفخر وقد يشوه القطعة الفخارية ويتلفها، ومثله اذا كان هناك التواء في القطعة الطينية قبل الفخر أيضا إذ سيزداد الالتواء نظرا للشد الحاصل بين جزيئات الطين في أثناء التسخين او التبريد.

كما ان القطع الطينية التي لم تجف جيدا وتحتوي على ماء اللدونة (الماء المضاف لعملية التشكيل) هذا ما قمنا بتسميته (الماء الفيزيائي)سابقا ، فان بقائه بالطين وعدم جفافه الكامل يؤثر سلبا على عملية الفخر وإظهار عيوب الفخر، ذلك لان هذا الماء المتواجد بين فراغات الصفائح الطينية سوف يسخن سريعا بالحرارة المسلطة من الفرن ويبدأ بالغليان السريع وسينتج هذا الغليان تحرير بخار الماء ونظرا لكمية الماء المتواجدة بين الجزيئات لا يستطيع بخار الماء من اللحاق بخروجه من جسد القطعة مما يؤدي الى الضغط الكبير على سطح وجدران النموذج الطيني فيعمل على تهشمه او حدوث الشقوق فيه، ويمكن لعملية الجفاف غير الكاملة للقطع الطينية ان تحدث تباينا بين السطح الخارجي الجاف والداخلي الرطب او شبه الجاف مما يؤثر على تباين الشد السطحي للسطحين هذا التباين والاختلاف يؤدي الى التقلص بمستويين مختلفين ينشا منه تشققات او التواء او تهشم حسب شدة الضغط واتجاهها، فلابد من إتمام الجفاف لسلامة الإنتاج الفخري ونجاح عملية الفخر.

وهنا لابد ان يتم تجفيف القطع الطينية قبل الحرق بطريقة منظمة وببطء شديد لتلافي حدوث أي شرخ او التواء يؤثر سلبا في أثناء عملية الحرق، كما ان التجفيف التام في جو الغرفة الاعتيادي او في مجففات خاصة من الماء والرطوبة مهم جدا كي نكون في مأمن في أثناء عملية الحرق ، وعلى الخزاف ان يفهم ويتعلم نظام التجفيف الصحيح حتى لا تتعرض قطعه للتلف.

وهناك طرق تجفيف سريعة تعجل من عملية تجفيف القطع وذلك بمرورها بأفران خاصة للتجفيف شكل (2-8) ويكون عملها ليس كعمل الأفران ولكن هي كالأفران الابتدائية التي تعمل على تجفيف القطع الطينية في أثناء مرورها من خلال غرف مفتوحة تحتوي على مسخنات خاصة وغرف دافئة تبث هواءً حاراً وعند مرور القطع الطينية في هذه الغرف تجف ببطيء ويكون جفافها تاما وبهذا نضمن جفاف القطع كاملا عند دخولها عملية الحرق وهذه أفران التجفيف غالبا ما تستعمل في المصانع الكبيرة.



شكل (2-8)يمثل فرن تجفيف

ثانيا - الرص في الفرن:

يعد رص الاعمال الطينية بالفرن لغرض حرقها عملية مهمة جدا وذلك لأنها تحدد أحيانا نجاح تلك العملية او فشلها، فعندما توضع القطع بطريقة مدروسة وبخبرة الخزاف فإننا سنحصل على نماذج مفخورة بطريقة صحيحة وناجحة، ولكن عندما نخفق بمعرفة كيفية رص وتنظيم النماذج في الفرن فإننا سنخفق بالحصول على نتائج ناجحة .

ان رص النماذج الطينية في الفرن مهم وتختلف القطع ذات ألاطيان واطئة الحرارة عن الأطيان عالية الحرارة وذلك لان عالية الحرارة تتعرض لدرجات حرارة أعلى ولمدة أطول مما قد يشكل ضغطا كبيرا على جدران النموذج في أثناء الفخر،وقد ترص أحيانا القطع في الفرن واطئ الحرارة بصورة اقل تنظيما من الأعمال في فرن عالي الحرارة ،ولكن في كل الأحوال لابد ان يكون رص القطع ضمن خطة متقنة لتلافي اي أخطاء مثل التهشم او الالتواء او الشدخ او تقليلها الى أدنى حد.

ويكون رص القطع في الفرن على رفوف حرارية مناسبة الحجم ومتوازنة ،ولابد من دهن الرفوف بطلاء يضمن عدم التصاق القطع بها ، و يتكون الطلاء العازل الجيد الذي تطلى به الرفوف و جدران الفرن والذي يجب ان يكون مقاوماً للحرارة ولا يلتصق بالقطع ويصنع طبقة عازلة بين القطع و رف الفرن الذي يحملها وعادة ما يتكون الطلاء من 90% الومينا و10% كاؤولين يخلط جيدا ويطلى به الرف أما بالفرشاة او بالسكب او بأي طريقة المهم يغطى سطح الرف بمادة عازلة لتوضع عليه القطع لغرض فخرها .

وأحيانا تستخدم علب كأنها صناديق توضع بها القطع لغرض فخرها وهذه الصناديق تستخدم لغرض حماية القطع من النار المباشرة وتستخدم غالبا هذه الطريقة في أفران الوقود الخشبية او النفطية .

كما انه يجب الانتباه فعندما تكون القطع رقيقة او خفيفة يجب ان توضع على بلاطة (رف) نيئة اي طينة غير محروقة مصنوعة من نفس طينة القطعة وبذلك نضمن عدم وجود تفاوت في نسبة الانكماش ، والقطع كالسلاطين و الأواني ذات الجدران الرقيقة غالبا ما تحتاج الى ان تنظم على طينة غير محروقة ، لكي نوفر ألامان لها ونعمل على حمايتها من الالتصاق وليكون جفافها منتظماً ولا يصير بها اعوجاج .

أحيانا يقوم الخزاف برص القطع الصغيرة بداخل القطع الكبيرة، ويجب رص وتنظيم القطع بالفرن على مسافة لا تقل عن بوصة عن مصدر الحرارة وإلا فإنها سوف تلتوي وتتشقق من تأثير واختلاف الحرارة بين أجزائها ، ويمكن أيضا ان يرص الفخار عالي الحرارة بطريقة مقاربة ولكن يحتاج الى الحرص على بترك مسافات بين القطع حتى لا تلتصق مع بعضها وحتى تكون تلك المسافات كافية لمرور التيارات الحرارية بين القطع وبذلك يتساوى نضج القطع من جميع الجهات

نظرا لضرورة حصول نضج تلك القطع بدرجات الحرارة المرتفعة، واذا كانت تلك القطع التي رصت في الفرن قد طليت بأي مادة لونية حتى وإن كانت غير مزججة اي لون فوق الطين قبل الحرق فان ذلك يستدعي الانتباه وعدم رص القطع بطريقة عشوائية او متقاربة خوفا من اختلاط الألوان او من الخدش وبذلك تكون هناك مسافة بين قطعة وأخرى ، كما ان هناك تقنيات يكون فيها حرق الفخر والتزجيج مرة واحدة ، وتلك القطع يكون رص القطع فيها بحذر وتكون هناك مسافة بين قطعة وأخرى وأحيانا تكون كبيرة كما في القطع المنتجة بطريقة زجاج الملح ، وكذلك في رص قطع البورسلين (الرقيق) ضعيف الاحتمال للحرارة، اذ تتعرض هذه الأجسام للهبوط نظرا لتحول جزء كبير منها الى الزجاج أثناء عملية الفخر الأولى ، ولذا يجب معرفة كيفية إسنادها وذلك بان ترص عادة على فراش او غطاء مصنوع من الالومينا او الفلنت ليطابق شكلها تماما وفي أثناء الحرق تهبط القطعة وتنطبق على مهدها او على الفراش الذي صمم لها وتطابقه تمام الانطباق لغرض المحافظة عليها من التشوه او تغيير شكلها نظرا لسلوك المادة وخصوصياتها.

وفي بعض الأحيان ترص القطع الأطباق (المواعين) بشكل خاص على قوالب خاصة محروقة تعمل كقواعد مع مراعاة طلائها بمادة الالومينا، اما الفناجين والطاسات فعادة ما تقلب على قرص طيني غير محروق وتوضع مقلوبة على فوهتها على حلقة طينية غير محروقة أيضا ، وكذلك تحتاج التماثيل فإنها الى مساند من أطيان غير محروقة .

ان الأطيان المستخدمة في عمل النماذج الفخارية تصبح رقيقة لينة عند حرقها لدرجة انها ترتخي الى الأسفل، وبذلك يكون الحامل المشكل سابقا نافعا لإيجاد عملية الإسناد فلا يكون التقوس هنا مشكلة ،ومع ذلك فالأطباق والأواني والقطع الرقيقة الأخرى لابد من تناولها بعناية عند رصها داخل الفرن لتجنب عدم تعادل الضغوط التي تؤدي الى تقوس القطعة او تهشمها داخل الفرن.

والتقوس يمكن تجنبه كثيرا باستعمال طريقة الرص الصحيحة والقواعد المهمة التي لابد توفرها :-

1- توضع القطع الرقيقة على قرص غير محروق من الطينة نفسها لتنكمش وتتقلص معا.

2- يجب وضع القطع الجوفاء الرقيقة على حوامل رص مخروطية من طينة غير محروقة لتحفظ استدارتها.

3- يجب وضع القطع المسطحة ذات الشفافية العالية على سطح مستوٍ تستقر عليه عندما ترتخي بالحريق، وهذا السطح اما ان يكون من الطين الحراري الخالي من الالومينا ،او قرصاً مشكلا من السليكا.

4- يجب وضع القطع الرقيقة المشكلة على ستاندات او دعامات من الطين غير المحروق.

مما سبق نصل الى حقيقة انه يجب ان يتعلم الخزاف ويتعرف على خصائص الأطيان التي يعمل بها وطبيعتها، كما لابد ان يعرف متى يمكنه ان يسرع في مختلف مراحل الإنتاج ولابد ان يعقد الصداقة بينه وبين المواد الخزفية.

ثالثا ـ درجات الحرارة:

ان للتحكم بدرجات الحرارة أهمية في الوصول الى نتائج صحيحة في عملية الفخر ،ولتلافي مشاكل تغير درجات الحرارة يعمد الخزاف الى إجراء عملية التدفئة قبل الحرق وهي ان يقوم الخزاف بعملية حرق خاصة اي بتدفئة القطع لمدة ليلة كاملة على درجات حرارة قليلة وبطيئة تتراوح بين(300-500درجة مئوية) وهذا سيقوم بإزالة كل الرطوبة الموجودة في القطع كما انه يعمل على تدفئة الفرن ليتبع ذلك عملية الحرق في اليوم التالي ، وكما أوردنا سابقا ان كل قطعة لم تجف تماما تكون عرضة للانفجار في الفرن اذا ما تعرضت الى درجات حرارة عالية وحرق سريع ، وحتى القطع الجافة تتعرض أحياناً للانفجار اذا تعرضت لصعود سريع بدرجات الحرارة تحت تأثير ضغط البخار الناتج عن تبخر المياه الكيميائية في القطعة.

تتوقف سرعة ارتفاع الحرارة على حجم القطع ومقاسات الفرن ، ففي الأفران الصغيرة وعند حرق القطع رفيعة الجدران يكون النظام المعقول لحرقها برص وتنظيم القطع بعد الظهر وتركها بالفرن طوال الليل ، ثم الوصول الى الحرارة المطلوبة في اليوم التالي خلال مدة من اربع الى ثماني ساعات ، اما القطع ثقيلة الوزن فتحتاج الى وقت أطول ،وعند الاقتراب من وقت نهاية الحرق يجب خفض درجة الحرارة وبذا تمتص القطع الحرارة بتعادل، ومن المفضل ان نستبقي درجة الحرارة ثابتة لمدة ساعة على الأقل بما يسمى عملية التشبع الحراري (Socking) كي نتأكد من نضج أجزاء القطعة تماما، وتقاس درجة حرارة الفرن بالقياس المضبوط بما يسمى الثرمومتر ، الا انه بسبب عدم

وجود ضوابط دقيقة في أكثر الأفران ذات الأسلاك فان عملية الحرق لابد ان تُترك للفرن بالضرورة ، ولا يعتبر هذا عيبا مادام الفرن يشي بطيئا في نهاية عملية الحرق.

ان تعادل درجة الحرارة في أنحاء الفرن أمر مهم للغاية، فإذا كان بعض أجزائه أكثر حرارة من البعض الأخر فإننا سنلحظ عدد من التشوهات التي لا يمكن تلافيها مما تؤثر على شكل القطع وعملية نضوجها وبالتالي ستكون غير صالحة فنياً.

رابعا ـ التبريد:

ان المرحلة الأخرى الخطرة بعد مرحلة الحرق والتي أحيانا لا ينتبه الخزاف المبتدئ الى أهميتها بينما يعرف الخزاف الخبير الممارس انها من العمليات المهمة نظرا لحصول عدد من التحولات والتفاعلات الكيميائية فيها ،هي مرحلة التبريد وهي تلي مرحلة الحرق وانجازها ،وتبدأ بالضبط بعد غلق مفتاح الوقود اي غلق الطاقة عن جوف الفرن وعن القطع فتبدأ مرحلة فقدان درجات الحرارة، فإذا ما تركت القطع في الفرن لتبرد وهو مقفل ،حتى ولو كان الفرن صغيرا فلا يصيب القطع اي تلف ، ويمكن تبريد الأفران الصغيرة في فترة ليلة كاملة اما الأفران الكبيرة فتحتاج على الأقل مدة أربع وعشرين ساعة ، ويجب الا يفتح الفرن ابدا مادام ساخنا عندما لا يمكن لمسه باليد وإلا فهناك خطر الشرخ والكسر اذا ما تم فتحه في هذا الوقت ، وحتى التبريد الطبيعي يتسبب عنه الكسر للقطع الكبيرة اذا ما حرقت في الأفران الخفيفة ذات السلك الخفيف وفي هذه الحالة يجب الإبطاء بالتبريد صناعيا .

خامسا ـ طرق التشكيل :

وهناك عدد من الطرق التي لها أهمية وتكون مؤثرة في نتائج عملية الحرق ومنها وجود الفلر(مواد المسامية) وهي تعني المواد التي تضاف الى الأطيان لتقليل اللدونة واللزوجة ولعمل المسامات اي لزيادة المسامية بالاطيان وهذه المواد هي الرمل او مسحوق الفخار ، والتي لها دور في عملية تنظيم الحرارة داخل جسم الطينة ،كون تلك المواد الداخلة في التركيب لا تمتزج مع الأطيان فتبقى هناك مسافات تسمح للحرارة بالدخول بين أجزاء الطينة وطبقاتها ، ولان الأطيان اللدنة تصير أكثر كثافة في أثناء الاشتغال بها وتشكيلها ولذا فان لطرق التشكيل تأثيرا محققا في حدوث التقلص

في الأطيان في أثناء الاحتراق وهذه المشاكل تحدث بصورة اكبر عند الخزاف في المعامل او عند صنع الخزف التجاري اكثر منه عند الخزاف في محترفه الفني ، لان الضغوط العالية التي تستخدم في الصناعة ليست عادة في متناول الخراف ويمكن ان تكون تلك الضغوطات كسرعة العمل وكثرة الإنتاج ووجود الأيدي العاملة الكثيرة وتفاوت الخبرة ، بعض ضغوطات المعامل الكبيرة الإنتاجية وهي السبب في حدوث أخطاء في عملية الفخر وحدوث مشاكل في الأجسام المفخورة .

ان الخزاف الذي يملك خبرة كافية يعرف ان الجسم الخزفي المصنوع بالصب من أطيان سائلة يكون تأثير عملية الحرق عليه مختلفا عن الأجسام التي شكلت من أطيان معجونة باليد ، وذلك لأنه في حالة الصب تتراكم الألواح على سطح القالب مرتبة باتجاه واحد وموازية له وبذلك تختلف ويقاوم عمليات الضرر في الفرن من إجراء الحرق .

وأن من اكثر عيوب طريقة التشكيل هي (البناء بالحبـال Coiling) تظهر بعدم تماسك الحبال ،لذلك فان الاواني تصبح كومة من الخطوط الملتحمة الضعيفة التي ستتعرض للتشقق أثناء التجفيف أو الحرق.

ومن الأخطاء الشائعة أيضا عدم تماثل الجدران مما يخلق آواني معيبة تتعرض للتلف لاختلاف تعامل أجزاء الآنية الواحدة مع الوسط المحيط في مرحلتي التجفيف أو الفخر، ويؤدي ذلك إلى حدوث مزيد من التشققات في أثناء الحرق، وقد يصل التلف إلى حد الألتواء أو الانبعاج، وقد ينتج عن إهمال الصانع أو عدم خبرته بطبيعة الاطيان المستخدمة في معالجة السطح العديد من العيوب التي تظهر جلياً في مرحلتي التجفيف أوالحرق أو في أثناء مدة الاستخدام الوظيفي، ومن أكثر هذه العيوب تطبيق طبقة من البطانة (Slip) من طينة غير طينة الإناء فيختلف معامل التمدد والانكماش لهما ،ويؤدي ذلك إلى حدوث تقشر أو انفصال و تشرخ (Peeling and crazing) ،ويحدث نفس العيب عندما تكون طبقة البطانة سميكة نتيجة تطبيقها بتغطية واحدة سميكة ، وإذا لم يكن الصانع ذا خبرة وقدرة على توحيد درجة التغطية بالفرشاة فإن ذلك سيخلق اختلاف في درجة التغطية ينجم عنه اختلافاً في درجة السمك فيحدث ذلك تشرخ أو تقشر أو انفصال فيبعض أجزاء البدن في أثناء التجفيف أو الحرق، ويمكن أن يحدث تشرخ إذا كانت طبقة البطانة ذات محتوى رطوبي أعلى من طينة الإناء فإنها سوف تتعرض للتشقق لاختلاف زمن تصلب البطانة عن نفس زمن تصلب الجسم الطيني ، وإذا

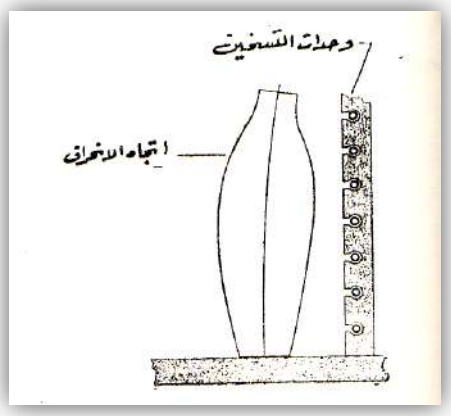
فشل الصانع في إحداث تغطية كاملة للسطح أو إزالة الفجوات أو النتوءات أو الحفر الموجودة بالسطح ، فإنها سوف تشوه مظهر السطح .

إن عملية الزخرفة قد يكون لها تأثير كبيرً على تلف الآثار الفخارية فمعظم العيوب التي تنتج في هذه المرحلة تكون نتيجة استخدام طينات ذات تركيب معدني وكيميائي غير متجانس ومحتوية على العديد من الشوائب، أو استخدام طينات مختلفة عن نفس طينة الجسم المشكل أو استخدام طينات ذات محتوىً رطوبي أعلى من طينة الجسم المشكل، أو يكون معامل تمددها وانكماشها مختلف عن معامل تمدد وانكماش الجسم المشكل، أو استخدام طينات لا تتصلب في نفس زمن تصلب الجسم الطيني في أثناء مرحلتي التجفيف أو الحرق، ومعظم تلك العوامل السابقة تؤدي إلى حدوث تشقق أو تشرخ أو اعوجاج الجسم الطيني في أثناء التجفيف أو الحرق.

ومن أنواع الأخطاء الشائعة من عملية الفخر:-

1- الالتواء Warping:

من الأخطاء الشائعة التي تصيب الجسم الطيني المحروق في عملية الفخر، اذ تتعرض الإشكال الرقيقة الجدران عادة الى الالتواء أثناء الحرق وذلك ناتجً من المسافة التي توضع بها القطع عن مصدر الحرارة كالوقود او الأسلاك ، اذ ان اقتراب القطع من الأسلاك يعمل على تجفيف الأسطح المواجهة للسلك بينما يكون السطح البعيد عن السلك غير متشبع حراريا ، وان ذلك الاختلاف في درجات الحرارة يؤدي الى توتر في القطعة الفخارية ، وذلك يمكن ان يسحب القطعة الطينية باتجاه مصدر الحرارة لزيادة تقلصه وبذلك يحدث الالتواء في جدران القطع الفخارية ، شكل(2-9).



شكل (2-9) يمثل حالة التواء النموذج

كما إنه قد يصاحب الانكماش غير المنتظم للجسم الطيني حدوث التــواء Warping أو تشوه Deformation ، ويظهر هذا العيب في الأواني التي تعرضت للحركة أثناء التجفيف، و كانت على اتصال بالأرض أو بالقرص، ويتولد عن ذلك بعض الضغوط المصاحبة للانكماش غير المنتظم، مما يسبب حدوث التواء وأيضا ان عدم تعادل او عدم ضبط التشكيل او التجفيف ينتج عنه الالتواء وبالذات في الاطيان غير المعالجة بإضافة الفلر (موادة مسامية).

يجب اخذ الاحتياطات اللازمة عند رفع وتحريك القطع الجدارية والسطوح المستوية باليد لضمان سلامة النماذج وتسطيحها ، وكذلك وضع مسافة جيدة ومصدات بين القطعة الطينية ومصدر الوقود لتجنب الالتواء في جدران القطع ، ويمكن أيضا وضع النماذج بعلب او صناديق خاصة توضع داخل الفرن لتأخير الجفاف السريع وإبطائه لنتمكن من تجنب الالتواء في القطع.

يؤدي الانكماش المختلف إلى حدوث الالتواء وذلك لعدة أسباب منها إختلاف معدل فقد الماء من السطح والجزء الداخلى ، كذلك التوزيع غير المتساوى للماء داخل الجزئيات وبالتالى الانكماش الكلى لكونه غير متساوٍ أيضا فإنه يتأثر بترتيب الجزئيات في أثناء التشكيل.

لقد تناول عدد كبير من الباحثين ظاهرتي الالتواء و التشقق اللتــين تحدثان في أثناء الحرق،

ومن أهم أسباب الالتواء مايلي :

قد يرجع سبب الالتواء إلى عملية التجفيف نتيجة انكماش التجفيف غير المتجانس، ويظهر بوضوح في القطع الطينية المشكلة بالبناء باللوالب أوالألواح الطينية، حيث يحوي السطح الخارجي محتوىً مائي أقل من الداخلي ، ولذلك يجف السطح الخارجي بسرعة كبيرة مما يسبب تقوس والتواء السطح نحو الداخل ويزداد الالتواء بالحرق .

غالبا ما يصاحب الالتواء تشقق، وذلك عندما يكون التوتر الناشئ عن الجفاف أكثر مما يستطيع الجسم تحمله ، ويزداد بالحرق ، وقد يرجع الالتواء والتقوس إلى طريقة الرص غير الصحيحة لعدم تعادل الضغوط الناشئة عن تناول القطع ، وقد يرجع التقوس أيضا إلي عدم تماثل الجدران في الإناء الواحد ، والأخير يعتمد على تقنية التشكيل وطبيعة الجسم وما يحتويه من شوائب.

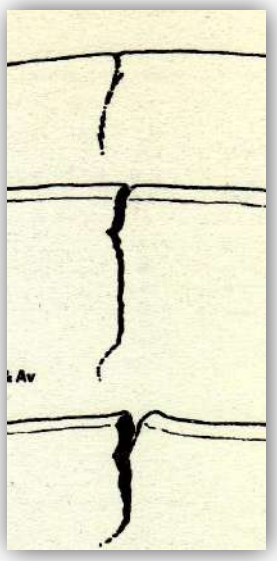
2- التقلص:

إن من الأخطاء الشائعة في أثناء الحرق التقلص الشديد اذ قد لا يكون الخزاف قد حسب حساباته بصورة صحيحة فتكون الحرارة الشديدة سببا في التقلص الكبير الذي يحدث ، والذي قد يشوه القطع الخزفية وقد يكون سببه التشكيل الأولي والمواد الداخلة في صناعة الجسم الخزفي كما أوردنا سابقا والذي لا يتحمل الحرارة فيؤدي التقلص الى اعوجاج القطع والتوائها او تكسرها بسبب تقلصها الشديد.

ويرجع معظم تلف الجسم الطيني وتشوهه إلى تبخر الماء المحيط بالحبيبات، والمعروف بالماء الميكانيكي ، فتقترب الحبيبات من بعضها، مسببة تقلص الجسم الطيني وغالبا ما يصاحب التجفيف انكماش طولي وحجمي وغالبا ما يقل الانكماش وما يصاحبه من عيوب، إذا كان الجسم الطيني محتوي على كمية قليلة من المحتوى المائي ، وترجع نشأة الشروخ والالتواء إلى تبخر الماء من السطح بسرعة أكبر من تبخر الماء بمركز الحبيبات لقلة إمداد السطح بالماء من الداخل، وينجم عن ذلك تقلص كبير للسطح عن مركز الحبيبات حيث يجد الماء صعوبة كبيرة في الهجرة نحو السطح لضيق المسام فتتولد نتيجة لذلك ضغوط سطحية Surface Stresses محدثة تشرخاً Cracking .

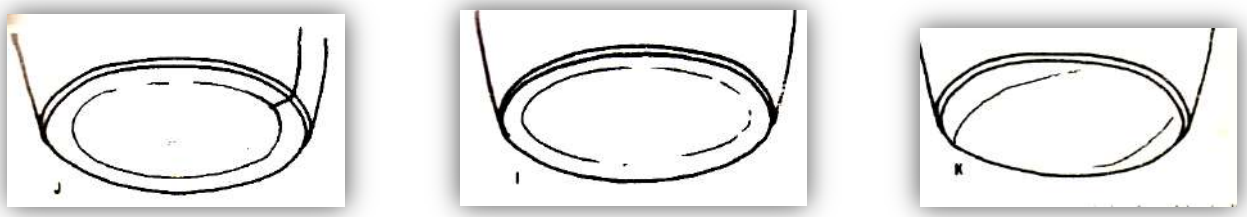
3- الشروخ Cracks :

وهي بمثابة عيوب تركيبية ، وقد تكون هذه الشروخ غير مرئية (invisible) إلا أن خطورتها تظهر بعد الحرق ، شكل (2-10)



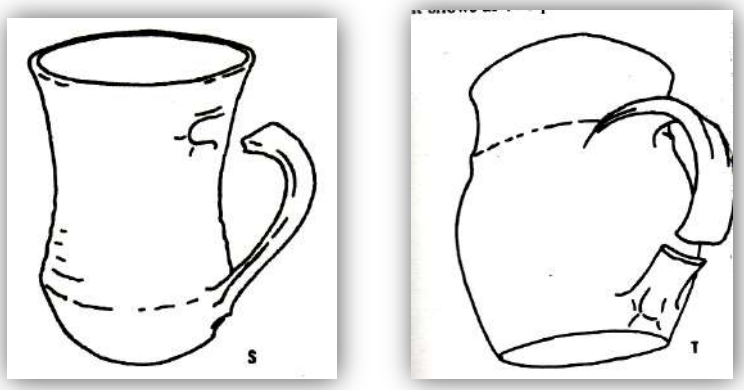
شكل (2-10) الشروخ غير المرئية وزيادتها بالحرارة

وهي من أكثر عيوب الانكماش غير المتساوي أثناء التجفيف ،وقد تأخذ هذه الشروخ عدة أشكال ولكن الشكل الأكثر شيوعا هو تلك الشروخ الموازية للسطح الذي يجف بسرعة أكبر من باقي أجزاء الجسم الأخرى، شكل (2-11).



شكل (2-11) شروخ موازية للسطح

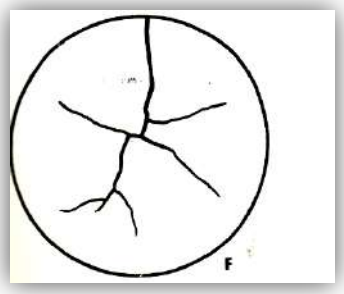
وغالبا ما تنشأ الشروخ في مناطق الضغط في أثناء التشكيل ، وتنتج الشروخ فى القطعة من الضغوط الميكانيكية وكذلك من التمدد والانكماش ،وتظهر الشروخ عندما تكون الضغوط أكبر مما تتحمله القطعة ،شكل (2-12)



شكل (2-12) شروخ الضغوط الميكانيكية

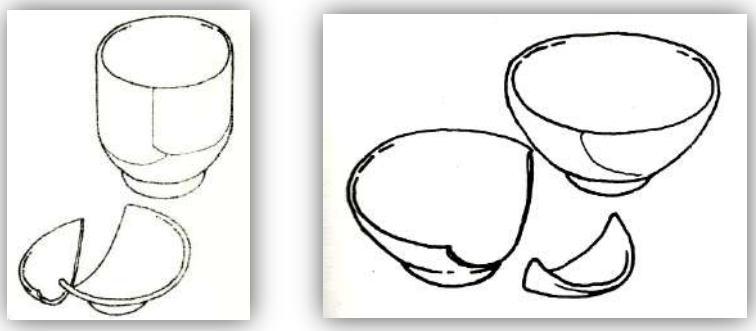
إن العديد من الشروخ تنشأ نتيجة الضغط الناشئ عن تبخر الماء أو احتراق المواد العضوية ، حيث يسبب تولد تلك الضغوط زيادة التغيرات الفيزيائية للجسم في أثناء الحريق ، ويعد ضغط بخار الماء أكثر خطورة من ضغط البخار الناجم عن احتراق المواد العضوية مثل التبن أو القش ،ويزداد

معدل ضغط البخار بارتفاع درجة حرارة الحرق ، وهذه الغازات المتولدة عن حرق المواد العضوية مثل الكربونات أو الكبريتات ذات تمدد حراري كبير، شكل (2-13)



شكل (2-13) تشقق من بخار الماء

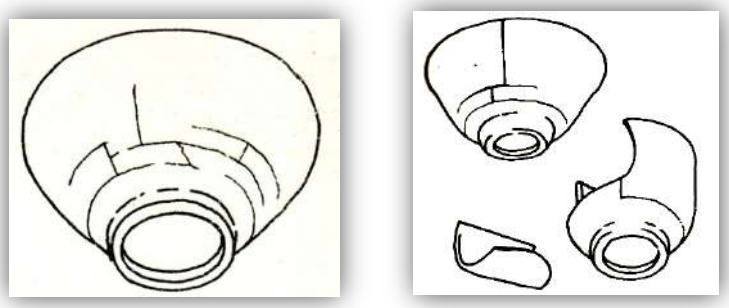
وإذا كانت درجة حرارة الحرق عالية فإن الوقت لا يكفي للسماح لهذه الغازات المحصورة في الخروج من خلال مسام الجسم أو القنوات الشعرية حتى تصل إلى القيمة الحرجة Critical Valueالتي لا تتسبب فقط في تشرخ الجسم بل قد تؤدي إلي انفجاره او تكسر اجزائه ، شكل (2-14).



شكل(2-14)يمثل تهشم وتشرخ القطع

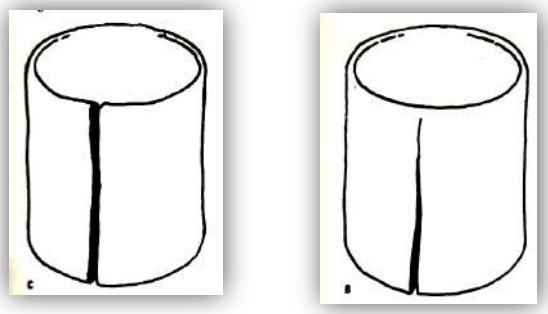
وقد يرجع التشرخ إلي نقص أو فقدان المادة العضوية التي توجد بكميات مختلفة ويسبب فقدها زيادة انكماش الجسم وبالتالي تشرخه ، و التشرخ قد ينشأ نتيجة التغيرات التي تحدث للسليكا مثل تحول الكوارتز من الفا إلي بيتا وهو تحول عكسي ، أو التحول إلي التريديميت أوالكريستوبلايت، حيث توجد

أطوار لكل منهما مثل ألفا وبيتا ويصاحب تلك التغيرات في ترتيب البلورات تغيرات في الحجم تخلق ضغوطاً في الجسم قد تؤدي إلي تشرخه ومعظم هذه التغيرات تحدث فجأة ، مما يؤدي إلي حدوث صدمات حرارية Sudden Thermal Shocks ينجم عنها العديد من الشروخ الدقيقة والشعرية، وقد لا تلاحظها العين ، ولكنها تظهر تحت الميكروسكوب، وتظهر بشكل واضح في الأواني المشكلة باليد أو المجمعة من أكثر من جـزء اي بواسطة الاشرطة او الحبال فيظهر الشرخ بمنطقة الالتصاق ،التي احيانا تكون غير مضبوطة فبالتجفيف التام بالحرارة يحدث ضغط على تلك المناطق الملصوقة فتنشرخ ، شكل (2-15).



شكل(2-15) الشروخ بالتشكيل

وفي بعض الأحيان في بداية مراحل الحرق قد تتكون أطوار زجاجية خاصة إذا لم تحرق المادة العضوية في مراحل الحرق الأولي، فتسد المسام وتعوق هجـرة أو خروج الغازات من داخل المسام ، فيزداد الضغط الذي يسبب نشأة العديد من الشروخ هناك بعض الشروخ التى توجد فى حافة البدن الخام وتتميز باتساعها عند الحافة وضيقها فى أسفل ويرجع هذا النوع من الشروخ إلى عيب فى التصميم حيث تكون الحافة رقيقة جدا بحيث لا تتحمل الضغوط ، كذلك فإن طريقة الصناعة قد تكون غير سليمة فقد يكون الجفاف سريعاً وغير متساوٍ ، شكل (2-16).



شكل (2-16) شروخ عيوب التصميم

وقد تظهر الشروخ ومازالت القطعة على عجلة الخزاف أو بمجرد إزالتها ويكون ذلك ناتجاً عن التحضير غير الكافي وقد تحتوى الطينة على المزيد من الرمل أو مسحوق الفخار ، وقد تكون الأطيان ذات رطوبة غير متساوية وبالتالي يحدث جفاف بدرجات غير متساوية .

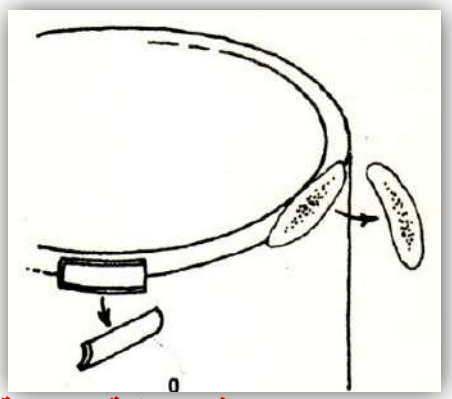
هذا بالإضافة إلى استخدام البطانة ومازال البدن رطبا مما يؤدي إلى حدوث تشوه ، وبالنسبة للشروخ الدقيقة فإن القطعة قد تكون ظلت فى ظل ظروف رطبة لمدة طويلة مما أدى إلى حدوث امتصاص وأدى ذلك إلى حدوث شروخ ، هناك بعض الشروخ التى توجد فى حافة البدن الخام الذي يمتاز باتساعه من أسفل وضيقه من أعلى ويحدث هذا الشرخ فى البدن الخام نتيجة الجفاف غير المتساوي ، أما سبب حدوث هذا الشرخ فى البدن المحروق والتزجيج معا فيرجع إلى تصدع التبريد (Cooling Dunt) الناتج بسبب تبلور السليكا التي تعانى من تحولات أو تغيرات فى التركيب البلوري ويصاحب ذلك تغير فى الحجم وهذه الضغوط بين البدن والتزجيج قد تكون غير كافية لكسر القطعة.

يحصل الشرخ في القطعة الفخارية عندما يكون التوتر بين صفائح الطينة في أعلى مستواه ،اي عندما يكون التوتر الناشئ من حرارة الحرق أكثر مما يستطيع ان يتحمله الطين، فكلما كان الطين أقوى كان انكماش الجفاف في أثناء الحرق اقل ، وقل احتمال تشققه ، والخزف العادي يميل قليلا الى التشقق والشروخ اذا حرق ببطء كافٍ ، اذ ان الصعود السريع لدرجات الحرارة او التبريد السريع هو الذي يؤدي الى اختلاف نسبة الانصهار بين جزيئات الأطيان ويسبب الشرخ في بدن الطينة في أثناء الفخر ، ويكون سبب الشرخ أحيانا الرطوبة الموجودة في الأطيان عندما يكون تجفيفه غير كامل ،ولنذكر انه من العبث ان نحاول الإسراع في عمليات صناعة الخزف .

4- التكسر أو التثلم:

وهو من الأخطاء التي يسببها وجود الشوائب في بدن القطعة (مثل البورك - الجبس- والكلس والأحجار وغيرها) التي يظهر تأثيرها في أثناء الحرق اذ ينكسر ويتثلم المكان الذي به شوائب

وأحيانا ، ومن الاسباب ايضا يكون اقتراب القطعة من الأسلاك او المصدر الحراري سببا للتثلم وتكسر أجزاء منها ، او السبب في الرطوبة المتبقية ، شكل (2-17).



شكل(2-17)التثلم في القطعة الفخارية

5- التهشم:

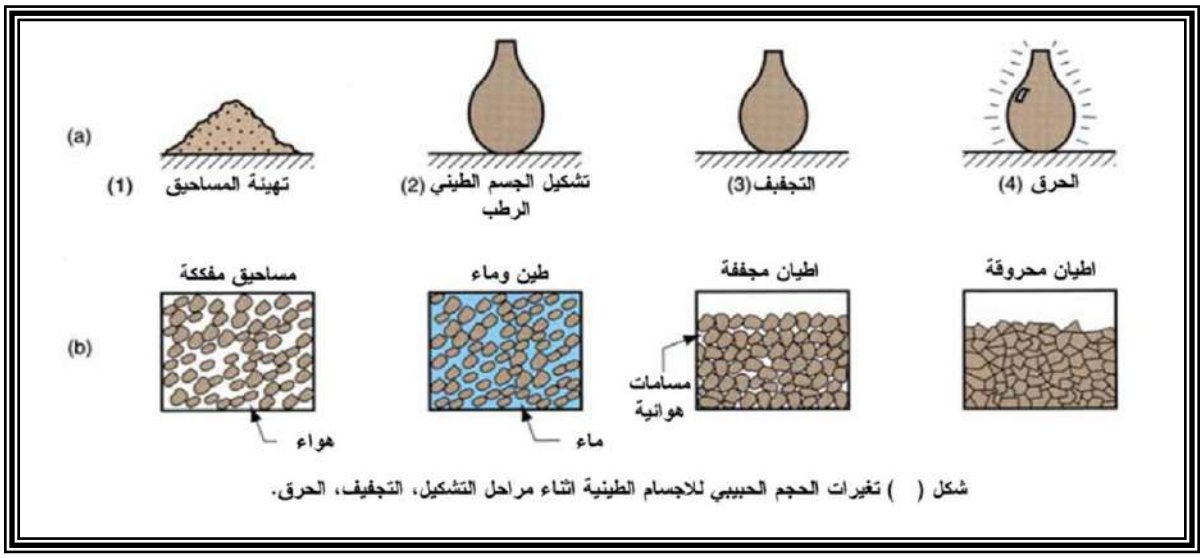
من أسبابه وجود البورك -الجبس- والكلس والأحجار والحصو وغيرها من الشوائب التي لا تتجانس مع بدن الجسم الطيني وبذلك يكون هذا الجسم الغريب سببا في انفجار القطعة في أثناء الحرق وتمدد الجسم الطيني وبالذات اذا كثرت تلك الشوائب في بدن القطعة، ويحدث أيضا من وجود الفراغات التي تحتوي على الهواء داخل جدران الطين في أثناء التشكيل والذي سببه عدم عجن الأطيان جيدا او طريقة التشكيل الخاطئة اوسمك الجدران الطينية في أثناء التشكيل، وأحيانا ماء الرطوبة المتبقي سببا في تهشم النموذج كاملا ، لذا لابد من معرفة الأسباب وتجنبها حتى لا نقع في الخطأ في أثناء عملية الفخر.

(2-11) تلبيد السيراميك المتقدم (Sintering).

يختلف تلبيد المواد السيراميكية عن فخر المنتجات الطينية من حيث ألية تكثيف المنتج فقد لاحظت عزيزي الطالب في عملية فخر الخزف حصول تحول في شكل صفائح الطين الى الشكل الابري وحصول تقارب بين حبيبات التركيب الجديد والاندماج ضمن الحدود الحبيبية باستمرار عملية رفع درجة الحرارة (شكل 2-18).

اما التلبيد فهو عملية تحويل المادة السيراميكية التي تم تشكيلها بأحدى طرق تشكيل المساحيق السيراميكية الى بنية صلبة و متماسكة في درجة حرارة أقل من درجة حرارة انصهار

المادة و باستخدام أفران معده لهذا الغرض، ويجب أن تكون حبيبات المسحوق قبل الحرق في حالة تماس تام (شكل 19-a)ولذلك عند ارتفاع درجة الحرارة فإن جدران الجسيمات المتماسكة



شكل ( ) تغيرات الحجم الحبيبي للاجسام الطينية اثناء مراحل التشكيل، التجفيف، الحرق.

شكل (2-18) تغيرات الحجم الحبيبي للاجسام الطينية اثناء مراحل التشكيل ، التجفيف ، الحرق .

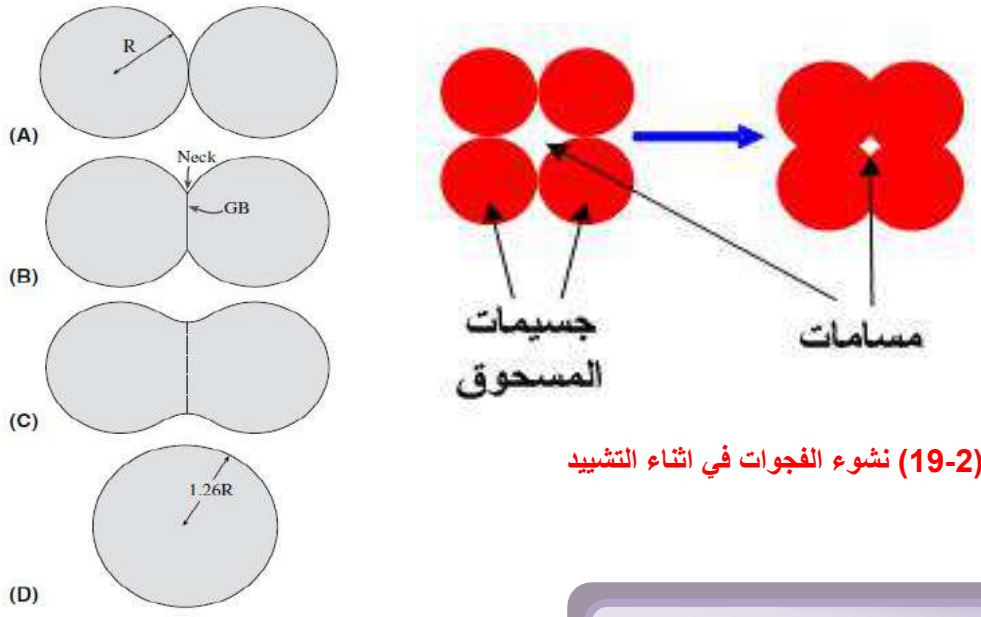
سوف تصل الى حالة من الليونة بحيث تسمح بتكون العنق أو الرقبة (Neck) كما في الشكل (19-2(b)) و هي منطقة الاتصال بين الجسيمتين المتماسكتين و باستمرار عملية الحرق سوف تبدأ مادة إحدى الجسيمتين المتصلتين بالعنق أو الرقبة بالانتقال و الانتشار في الجسيمة الأخرى الشكل (19-2 (c)) حتى يتم انتقال كامل المادة و تدعى هذه المرحلة بالنمو الحبيبي General Growth و تتحول مجاميع الجسيمات (Particles) إلى حبيبات (Grains) كما في الشكل (19-2 (d))بحيث اذا حصل انتشار تام فان نصف قطر الحبيبة الناشئة يعادل 1.26 من نصف قطر جسيمة المسحوق قبل التلبيد.

درجة حرارة التلبيد تبدأ تقريبا من ثلاثة أرباع درجة حرارة الانصهار للمادة الملبدة.

لذلك فإن عملية التلبيد تؤدي إلى التغيرات التالية:

1- زيادة الحجم الحبيبي.
2- تغير في شكل المسامات.
3- تغير حجم المسامات و النسبة المئوية لوجودها في المادة.

حيث تؤدي عملية التلبيد إلى تقليل المسامات (الفراغات) من خلال الضغط على الهواء الموجود بين الحبيبات و إخراجه، حتى تصل إلى مرحلة تبقى معها فجوة صغيرة غير متصلة ما بين الحبيبات عندما تصل إلى نهاية الانتشار(Final Diffusion) كما في الشكل (2-19) .



شكل (2-19) نشوء الفجوات في اثناء التشييد

(2-12) تأثير عمليات التلبيد على الكثافة.

بسبب تقارب الجسيمات مع بعضها في أثناء عملية التلبيد فأن تناقصاً في الحجم يحصل للجسم السيراميكي و بالتالي يحدث تزايد في كثافة الجسم شرط أن لا يحصل فقدان كبير في كتلة الجسم السيراميكي.

هنالك عاملان مهمان يؤثران على كثافة الجسم الملبد هما درجة الحرارة المستخدمة وزمن المعاملة الحرارية، لذلك فان مخطط تغير الكثافة (ρ) مع درجة حرارة التلبيد (T_s) يتضمن ثلاث مناطق رئيسية (شكل 2-20)

1- منطقة نشوء الرقبة I(Neck formation region) : و فيها تتكون منطقة الرقبة بين الجسيمات حيث يبدأ الحجم بالانخفاض الشديد مع زيادة درجة حرارة التلبيد مما يؤدي إلى زيادة شديدة في الكثافة.

2- منطقة النمو ونشوء المسامات المفتوحة II (Growth and open pore region) :

يحصل النمو الحبيبي بزيادة درجة حرارة التلبيد و تظهر أنابيب مفتوحة متصلة بسطح الجسم السيراميكي و تستمر فيها زيادة كثافة الجسم و لكن بمعدل أقل من المنطقة I .

3- منطقة النمو و نشوء المسامات المغلقة III(Growth and closed pore region)

: مع استمرار زيادة درجة الحرارة (T_s) فأن عملية إنماء الحبيبات تكون مستمرة حتى تصل عملية النمو إلى غلق المسامات التي نشأت في المرحلة II من جميع الجهات و حبس جزء من المسامات بين الحبيبات ولاتكون متصلة بسطح الجسم السيراميكي ، و مهما زادت درجة الحرارة فإن هذه المسامات لن تخرج من الجسم و بذلك فأن الماده ستأخذ شكلها النهائي و عند زيادة درجة الحرارة فأن ألماده تصل إلى درجة حرارة الانصهار. وفي نهاية هذه المنطقة تصل كثافة الجسم إلى حد الإشباع (saturation).

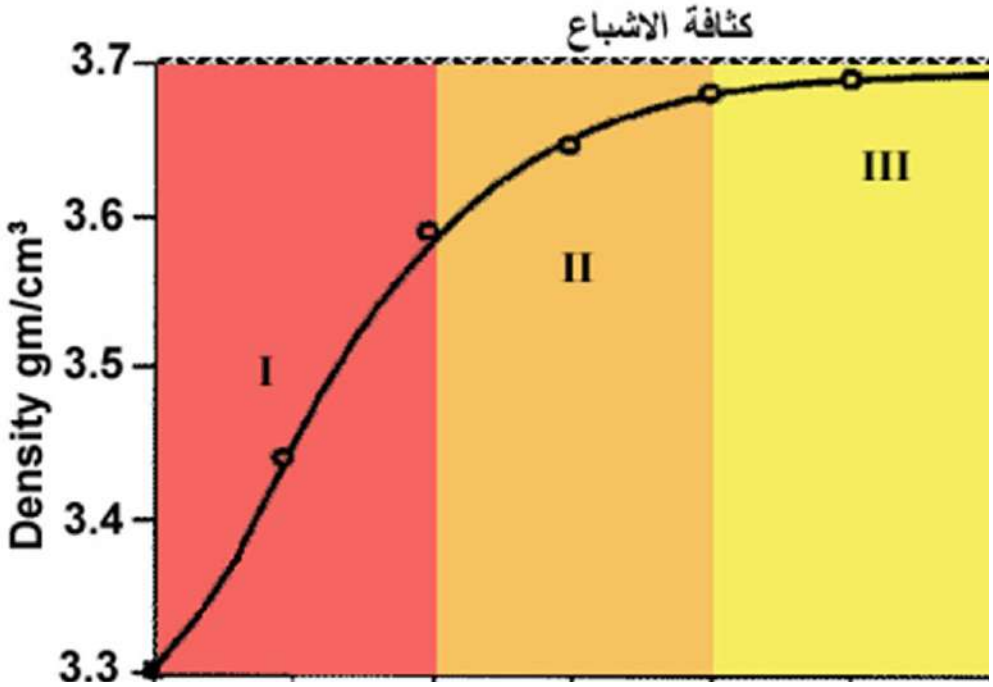
إن كمية المسامات المغلقة المتبقية تعتمد على :

1- مقدار رص جسيمات المسحوق أثناء التشكيل و يعتمد بدوره على نوع التشكيل.

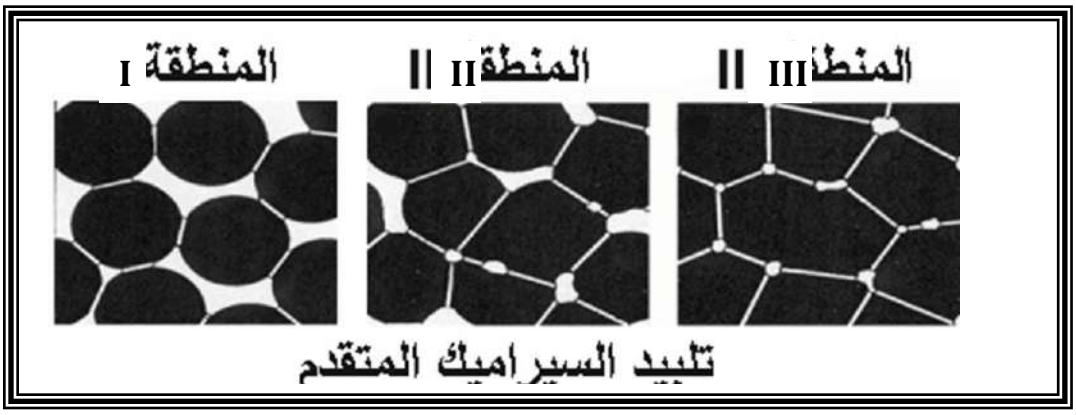
2- الحجم الحبيبي للمسحوق و التدرج الحبيبي.

3- تجانس حجوم الحبيبات.

يحدث في عملية التلبيد تفاعل بين الجزيئات في الحالة الصلبة و يسمى (تفاعل الحالة الصلبة (Solid state reaction)) و قد تكون نتيجة هذا التفاعل ظهور طور أو أطوار جديدة متعددة مثل ظهور طور المولايت نتيجة تفاعل الالومينا (Al_2O_3) مع السليكا (SiO_2) ، و قد يحدث أيضا تحلل حراري للمادة ينشأ عنه تحرر غازات و أبخرة عديدة من المادة بسبب التفاعل مع جو الفرن أو تحولات في المادة السيراميكية من طور إلى آخر.



شكل (2-20) تغير الكثافة مع درجة حرارة التلبيد لمادة



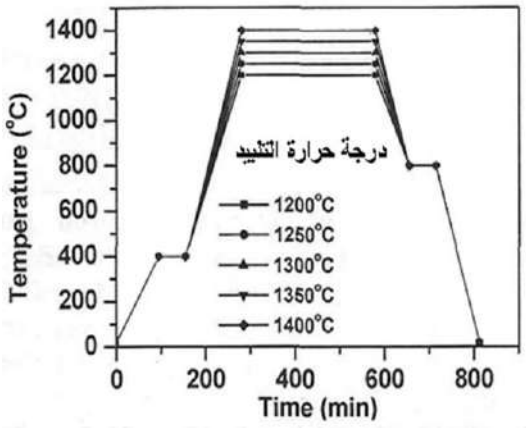
شكل (2-21)

(2-13) العوامل المؤثرة في عملية التلبيد.

1- زمن المعاملة:

يقصد بزمن المعاملة المدة الزمنية اللازمة لحدوث المراحل الثلاث لتغير الكثافة حيث كلما كانت المدة الزمنية أطول كان التلبيد أعلى (زيادة في الكثافة) و يفضل في تلبيد الأجسام السيراميكية تجزئة المدة الزمنية بحيث تكون هنالك مدد زمنيه نثبت عندها درجة الحرارة للسماح بحصول التغيرات الفيزيائية و الكيميائية و التحولات الطورية دون أن يحصل عيب مثل الشروخ في الجسم السيراميكي.

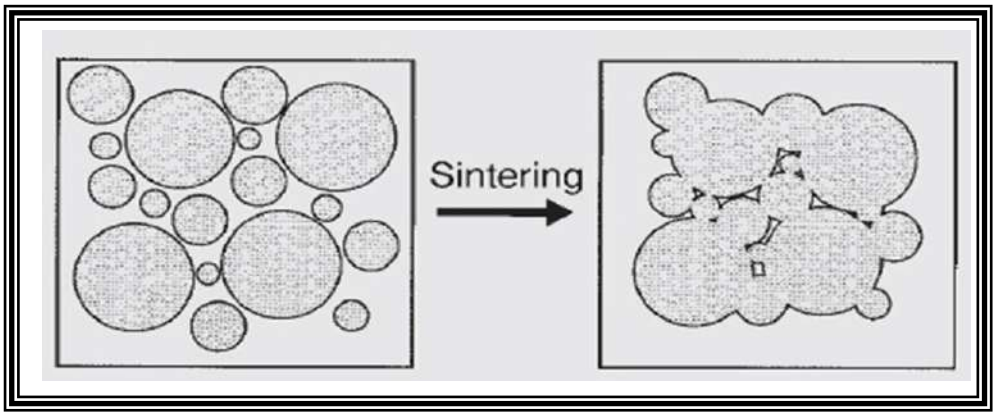
فمثلاً في أثناء حرق الكاولين وتلبيده نثبت درجة الحرارة عند درجة تتراوح ما بين (450- 500 درجة مئوية) للسماح بخروج الماء الشبكي، و كذلك التثبيت عند درجة حرارة تتراوح ما بين (1000-1100 درجة مئوية) للسماح يتحول الميتاكاولين الى المولايت و من ثم رفع درجة حرارة المادة الى درجة الحرارة المطلوبة لزيادة الكثافة بالتلبيد، شكل (2-22) .



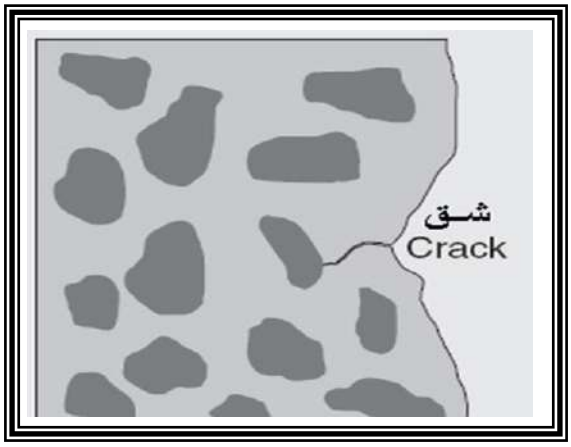
شكل (2-22)

2- الحجم الحبيبي و التوزيع الحجمي للمسحوق السيراميكي:

وجود الحبيبات الناعمة في المسحوق السيراميكي يجعل الجسم السيراميكي أكثر تراصاً و اسرع اندماجاً من الحبيبات الخشنة شكل (2-23) إلا أن وجود الحبيبات الخشنة ضروري خصوصاً في الحراريات لتوقيف نمو الشقوق المجهرية في أثناء عمليات التغير الحراري المفاجئ شكل (2-24) .



شكل(2-23)



شكل (2-24)

3- تركيب المادة المكونة للنماذج السيراميكية:

وجود بعض المواد المساعدة على الصهر يحسن من الخواص التلبيد مثال ذلك وجود مركبات معدنية طينية أو غير طينية تكون طوراً زجاجياً يحيط بالحبيبات المكونة للجسم السيراميكي فيجعله ذا مقاومة عالية و أيضاً وجود اكاسيد مساعدة على الصهر في الاطيان مثل (K_2O, Na_2O, CaO, Fe_2O_3,....) يقلل من درجة حرارة الانصهار و يحفز عملية التلبيد للحدوث في وقت مبكر، كذلك وجود هذه العناصر يؤثر بصورة مختلفة في المدى الحراري لعملية التلبيد، فعنصرا الصوديوم و البوتاسيوم يعملان على توسيع عملية التلبيد دون حدوث انصهار مفاجئ ، وذلك لكون الاطوار البلورية المتكونة التي يشتركان فيها تمتلك لزوجة عالية، في حين تتأثر عملية التلبيد سلبياً عند تواجد الكالسيوم و المغنيسيوم لان الاطوار البلورية الجديدة المتكونة بإستمرار رفع درجة الحرارة

تعيق عملية التلبيد و غالباً ما ينحصر المدى الحراري لعملية التلبيد بين درجة حرارة (- ^{o}C1200 900) للاطيان في المنتجات العامة و تزداد في المنتجات التي تتطلب مواصفات خاصة.

4- فرن التسخين و الحرق:

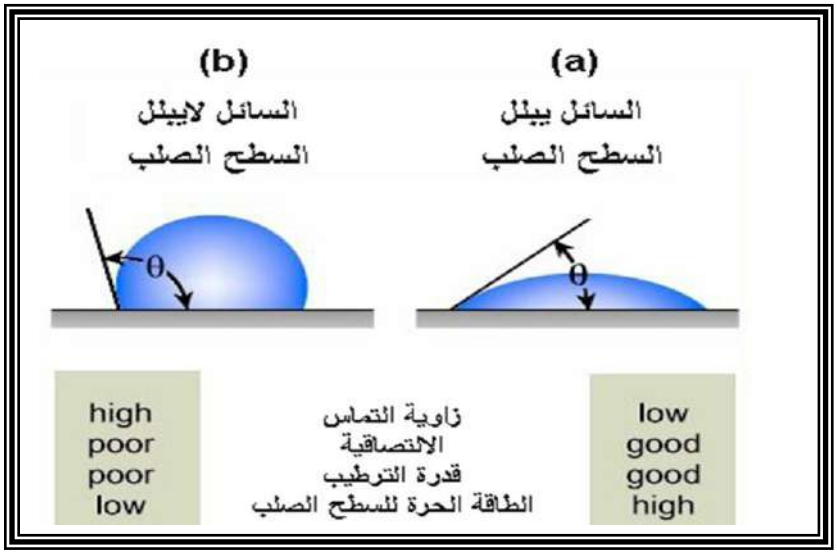
حيث يؤثر نوع الغاز الموجود في الفرن على مقدار الكثافة مثل الهواء و الغازات الخاملة.

5- ضغط فرن الحرق و التسخين:

وقد تجرى تحت الضغط الجوي (بوجود الاوكسجين) أو في الفراغ مثل عملية الكبس على الساخن التي تجرى فيها عملية التلبيد تحت ضغط عالٍ.

(14-2) التلبيد بالطور السائل (Liquid phase sintering):

من المعروف ان المواد السيراميكية المتقدمة مثل الالومينا و الكاربيدات و النتريدات تحتاج الى درجات حرارية عالية جداً للوصول الى التلبيد في الحالة الصلبة لارتفاع درجة حرارة الانصهار و لذلك يلجأ الصناعيون الى ربط هذه المواد من خلال أضافة مواد ذات درجة حرارة انصهار أقل و بنسب محددة هذه المواد المضافة تنصهر و تتحول الى طور سائل يتغلغل بين الحدود الحبيبية للمساحيق السيراميكية و يعمل على ربطها بخاصية التلاصق و لذلك فان نجاح عملية التلبيد بالطور السائل تعتمد على مقدار ترطيب الطور السائل مع المادة الصلبة و هذه الخاصية مختلفة من مادة الى آخرى و يتم قياس قابلية الترطيب أو التبلل من خلال زاوية التماس (Contact angle) بين الطور السائل و الصلب (شكل 2-25) فإذا كانت زاوية التماس (ϑ<90^{o}) (زاوية حادة) يحصل ترطيب و يتغلغل الطور السائل بين حبيبات الصلب و يحصل تلاصق و تنجح عملية التلبيد الشكل(2-25a) أما أذا كانت زاوية التماس ϑ>90^{o} (زاوية منفرجة) فان الطور السائل لا يرى الطور الصلب و بالتالي لا يحصل تلاصق بين الطور السائل و الصلب و لا تنجح عملية التلبيد في الطور السائل بشكل كامل. شكل (2-25b).



شكل (2-25)

الجدول (2-1) يوضح زاوية الترطيب للطور السائل مع الصلب، حيث نلاحظ أنه من الممكن أن يكون الطور السائل ناشئاً من سيراميك ذا درجة انصهار واطئة أو زجاج أو معدن و يعتمد على نوع التطبيقات المستخدمة كما في الجدول (2-2).

هناك بعض الصعوبات التي تواجهها عملية التلبيد بالطور السائل تتضمن:

1- بسبب عشوائية الطور السائل فانه قد لا يكون موحد الخواص لجميع أجزاء السائل.

2- إذا كانت طبقة السائل رقيقة فإنها تعد طبقة امتصاص و ليست طوراً سائلاً.

3- اللزوجة تتغير مع درجة الحرارة و تركيب المادة.

أختلاف معامل التمدد الحراري بين الطور السائل و الصلب قد يؤدي الى ظهور شقوق مجهرية تمثل مناطق ضعف داخل الجسيم السيراميكي بعد التلبيد.

المادة	التطبيق
$BaTiO_3/LiF/MgO$	متسعات
$BaTiO_3/SiO_2$	متسعات
Co/WC; TiC/Mo/Ni	ادوات القطع
$Fe/Al_2O_3/C$	مواد الاحتكاك
$Al_2O_3/glass$	مواد التغليف
Si_3N_4/Y_2O_3	عدد تشغيل المعدن
Clay/feldspar/flint	البورسلين
Si_3N_4/MgO; SiC/B	الحراريات
$Al_2O_3/MgO/SiO_2$	الحراريات
AlN/Y_2O_3	سطح الترسيب
ZnO/Bi_2O_3	مقاومة متغيرة

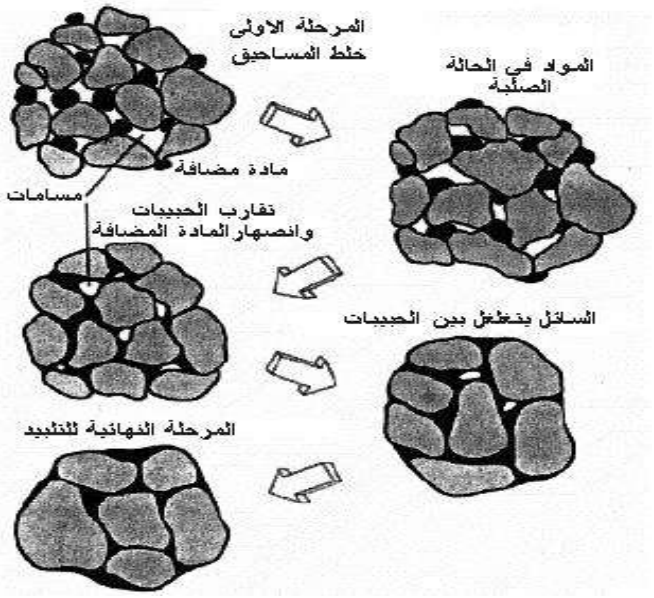
جدول (2-1)

مقدار زاوية التماس بين السطح الصلب **MgO** والطور السائل

الطور السائل	درجة حرارة القياس (°C)	زاوية التماس
Cu	1300	106
Ag	1300	136
Co	1600	114
Fe	1600	59
Basic slag[a]	1400	9

[a]Composition: 40% SiO_2, 20% Al_2O_3, 40% CaO.

جدول (2-2)



المخطط يوضح مراحل عملية التلبيد بالطور السائل.

اسئلة الفصل الثاني

1/ ماهو البرنامج الذي لابد ان يضعه المشتغل منذ بدء عملية الفخر حتى انتهائها ؟

2/ أرصد عملية التحول في معادن الطينة في اثناء الفخر منذ ارتفاع درجات الحرارة حتى انتهاء عملية التبريد ؟

3/ أرسم مع التأشير اهم الانقلابات في معادن الاطيان (وبالذات السيلكا) في اثناء الفخر ،مع الشرح بالمعادلات والتأشير بالأسهم ؟

4/ عدد مراحل التفاعلات الكيميائية داخل الفرن مع الشرح.

5/ من تأثير عملية الحرق على المنتوج الفخاري هي التغيير في خواصه الفيزياوية ، ماهي هذه التغييرات ؟ تكلم عنها.

6/ ماذا نعني بالنمو البلوري في اثناء عملية الفخر ، وما علاقة ارتفاع درجات الحرارة في اثناء الحرق وانخفاضها اثناء التبريد بالنمو البلوري ؟

7/ ماهي المسامية ،وكيف تتغير بعد عملية الفخر ؟اشرح عن ذلك مع الرسم .

8/ كيف يحدث التقلص في الاطيان في اثناء عملية الفخر ، وماهي المعادلة الخاصة بقياس التقلص الناتج من الحرق ؟

9/ ماهي اهم المؤثرات التي لابد ان يراعيها المشتغل بعملية حرق القطع في اثناء تقنية الفخر ؟

10/ هناك اخطاء تحدث عند عملية الفخر عددها مع الشرح والرسم .

11/ ماهي ابرز الفوائد المتوخاة من حرق المنتجات الخزفية.

12/ ماهي الاسباب التي تجعل بعض المنتجات الخزفية الطينية ضعيفة في تحمل درجات الحرارة العالية.

13/ ماذا يحصل للمنتجات الخزفية اذا حرقت مباشرة بعد التشكيل دون اجراء عملية التجفيف.

14/ ماذا يحصل للمنتجات الخزفية المفخورة اذا تلامست مع بعضها البعض اثناء عملية الفخر.

15/ شكل بلورات حبيبات الطين..... يتحول الى ..... عند الحرق بدرجة حرارة اكبر من 1100 ^{o}C.

16/ تتحول الكاولينايت الى مركبين عند الحرق بدرجة حرارية اكبر من ^{o}C 1100 هما ..... و .....

17/ يحصل اندماج بين دقائق المساحيق السيراميكية عند رفع درجة الحرارة الى ..... من درجة حرارة انصهار المادة.

18/ ما هو دور الاكاسيد الموجدة مع معدن الكاولينايت في خام الكاولين على عملية الحرق والتلبيد.

19/ ما المقصود بالميتا كاولين وهل يختلف عن المولايت.

20 / نموذج خزفي اسطواني ابعاده بعد التجفيف (القطر 5 cm ، الطول 10 cm) وكتلته 250 g ، ادخل الى الفرن وحرق فكانت ابعاده بعد الحرق (القطر 4 cm ، الطول 8 cm) وكتلته 200 g. احسب مقدار الانكماش في الابعاد والحجم والتغير في الكثافة نتيجة الحرق.

21 / ما الفرق بين الحجم الحبيبي (Grain Size) وحجم دقائق المساحيق (Particle Size).

22 / هل من الممكن الحصول على كثافة تامة للمنتج السيراميكي عند زيادة درجة حرارة التلبيد؟

23 / ايهما افضل المساحيق الناعمة ام الخشنة في زيادة حركية عملية التلبيد.

24 / يحصل تلبيد للطور السائل مع الصلب اذا كانت زاوية التماس مقدارها .....

ولا يحصل تلبيد للطور السائل مع الصلب اذا كانت زاوية التماس مقدارها .....

25 / هل من الممكن ارجاع اللدونة المفقودة من الاطيان المحروقة ولماذا؟

26 / اذا كانت لديك مادتين سيراميكيتين Al_2O_3 درجة انصهارها ^{o}C 2050 والاخرى SiO_2 درجة انصهارها ^{o}C 1700 هل من الممكن الحصول على خليط وبنسب معينة بحيث تكون درجة انصهاره اقل منهما . وضح ذلك.

الفصل الثالـــــــــــث

الأفران



أهداف الفصل الثالث:

من المتوقع أن يتعرف الطالب على :

1- أنواع الأفران ومعداتها.
2- أنواع الوقود المستعمل في الأفران.
3- مميزات الأفران.

محتويات الفصل الثالـــــث

(1-3) وصف الأفـــــــران
(2-3) أنواع الأفـــــــران
(3-3) قياسات الأفـــــران وحجومها
(4-3) طرق قياس درجة حرارة الأفران
(5-3) الوقود

(3-1) وصف الأفـــــــران

ان افران الخزف متعددة الأشكال وقد بدأ الانسان ببنائها منذ القدم ، وافران الخزف بصورة عامة بغض النظر عن حجمها ومادة الوقود المستخدمة فهي غرف صغيرة كانت ام كبيرة مغلقة من الداخل بطابوق مقاوم للحرارة ببناء محكم الجدران وعدم وجود فتحات او شقوق لمنع للحرارة من الخروج قدر المستطاع كذلك يجب ان لا يقل سمك جدرانها عن (52 cm) ويزداد بزيادة حجم الفرن وبعكس هذا ستطول مدة التشغيل وسيزداد استهلاك الوقود او الطاقة وتوجد في جميع الأفران فتحات خاصة مزودة بسدادات فتح وغلق بخروج الأبخرة ومراقبة سير الحرارة والنضوج .

وان مادة الوقود المستعملة سواء كانت من الكهرباء او النفط الأبيض او الأسود او الغاز و الفحم الحجري او الخشب وهو اول وقود استخدم جميعها تؤدي الى نفس الهدف وهو الوصول الى درجة الـــــحرارة المطلوبة سواء كان الأنتاج قطع طينية لفخرها او الوصول الى درجة ذوبان الزجاج للأنتاج المزجـــــج و تعد الصين واليابان من الدول الرائدة في بناء الأفران الضخمة و والعالية الحرارة والشـــديدة التعقيـــد والدقة في السيطرة على الحرارة.

تمكن الصينيون قبل عدة قرون من بلوغ درجة اكثر من (1100 ^{o}C) بأفران وقودها الخشب وهي الخطـــوة الأولى للوصول الى صناعة البورسلين وتعد الانتاجات الخزفية الصينية القديمة التي انتجت بأفـــران وقودها الخشب من روائع الخزف العالمي وتوجد في الصين واليابان افران لم تتغير تصاميم بنائها منذ آلاف السنين ولم تتوصل التقنية الحديثة في الأفران الكهربائية حاليا من بلوغ مستوى تلك الأنتاجات الخزفيـــة لأفران الخشب الصينية واسرارها التصميمية وعليه يجب معرفة الابعاد الصحيحة للفرن ونظام الفتحـــات والتهوية والمدخنة وعلاقتها ببعضها البعض .

(2-3) انواع الأفـــــــران

انواع الأفـــــــران

تستعمل الافران في الصناعات السيراميكية والخزفية لاغراض عدة منها:

1- عملية التلبيد :

وهي عملية لاحقة بعد أجراء عمليات التشكيل والتجفيف وتتم بدرجات حرارية اكبر من (^{o}C 1200) في معظم الاحيان ويتم فيها تقارب الحبيبات واندماج الحدود الحبيبية من الحالة الصلبة.

2-اجراء التفاعلات:

في بعض الاحيان تكون هناك حاجة لاجراء تفاعل بين مادتين او اكثر لغرض الحصول على تركيب سيراميكي محدد مثل تفاعل الالومينا Al_2O_3 مع السليكا SiO_2 للحصول المولايت.

$$3Al_2O_3 + 2SiO_2 \xrightarrow{>1500\ ^{\circ}C} Al_6Si_2O_{13}$$

3- أجراء التحولات الطورية:

العديد من المواد السيراميكية يحصل فيها تحول طوري نتيجة ارتفاع درجات الحرارة ومثال ذالك تحول المركب المتمثل بالكوارتز الى الترديمايت ومن ثم الكوستويلايت عند ارتفاع درجة الحرارة.

4-صهر الزجاج:

لغرض تشكيل الزجاج يصار الى صهره وتحويله الى سائل عادة مايتم صهره بدرجة حرارة تتراوح ما بين (^{o}C 1300 الى ^{o}C 1600) وعادة ما يكون هذا المنصهر فعالاً كيميائيا مما يسبب تأكل الافران ولذالك يجب اختيار مواد حرارية لبطانات الافران الخاصة لصهر الزجاج.

5- إجراء الإنماء البلوري:

عملية الانماء البلوري هي تحويل بنية التركيب العشوائية الى بلورية منتظمة وتتم عادة بصهر المادة العشوائية في أفران خاصة وتبريدها ببطء شديد فيحصل النمو البلوري ويحدث ترتيب للذرات وتدعى عندها المادة بالبلورة.

يمكن تصنيف الأفران التي تستعمل في الصناعات السيراميكية بالاعتماد على مصدر الحرارة:

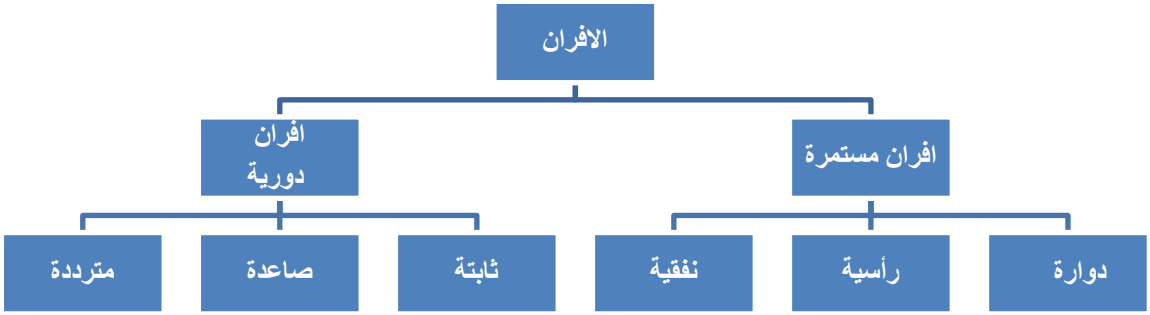
1- أفران الأحتراق Combustion
2- أفران المقاومة الكهربائية Electrical Resistivity
3- أفران المايكروويف (الترددات الراديوية RF او ترددات الاشعة تحت الحمراء IRاو ترددات الضوء المرئي).

ويمكن جمع اعلاه بنوعين من الافران هما:

1- الأفران الدورية او أفران الدفعة periodic or batch furnaces
2- الأفران المستمرة continuous furnaces

وبشكل عام يمكن تصنيف الأفران الى صنفين:

1_ الأفـــــران الكهربائية
2 – أفـــــران الوقـــود



(3-2-1) الأفران الكهربائيـــــــــــة :

الأفران الكهربائية منتشرة الاستعمال في الوقت الحاضر بسبب سهولة نقلها من مكان الى آخر ولا تحتاج الى اماكن واسعة ويمكن وضعها داخل بناء مسقوف وسهلة التشغـــيل ولها ادوات واجهزة للسيطرة على سير الحرارة واجهزة توقيت الحرارة المطلوبة ويتوقف الفرن تلقائيـــا عند الوصول الى درجة الحرارة المطلوبة وليس لها فضلات كالدخان والابخرة الضارة بالبيئة والصحـــة ومتوفرة بكافة الأحجام ابتداءً من فرن التجارب الصغير الى حجم ($2\ m^3$) ومن الناحية الأخرى هي عاليـــــة الثمن وعملية اصلاحها باهضة الثمن . انظر الشكل (3 - 1)

والفرن الكهربائي يتكون من :

1- صندوق حديدي مغلف من الداخل بطابوق مقاوم للحرارة ومن النوع الذي يمكن تقطيعه بمنشار الخشب ، علما انه يوجد نوع آخر صلب جدا وثقيل الوزن يستعمل لأنواع آخرى يغلق بأحكام بواسطة الســـمنت الحراري الخاص .

2- الأسلاك الحرارية وهي ملفوفة بشكل حلزوني من نوع يسمى (الكنثال) شكل (3 – 1) تثبت هذه الأسلاك علـــــى جدران الفرن الأربعة وماعدا السقف ، تثبت على الجانبين والأرضية حسب حجم الفرن ، داخل سواقي محفورة في جدران الفرن بدقة تحضن هذه الأسلاك والا سوف تتدلى بسبب ليونتها في اثناء تصاعـــــد الحرارة ولا يمكن ارجاعها الى مكانها.

ولأفران الخزف أحجام وتصاميم كثيرة تصنع حسب كمية الإنتاج وهي ثلاثة أحجام :

1- أفران المدارس والمعاهد والكليات ومشاغل الفنانين:

تكون هذه الأفران متوسطة الحجم لا تتجاوز المتر المكعب او اقل من ذلك وهي كافية للطلبة المبتدئين وهذه الأفران تعبأ من الأمام عند فتح الباب وبالإمكان حمل القطعة باليد ووضعها في نهاية الفـــــرن وكلما اتسع حجم الفرن ارتفعت تكاليف نصبه وتشغيله لأن مثل هذه الأفران تتغذى بالتيار الكهربائـــي من ثلاثة دورات الى خمسة ولكل دورة مفتاح يتحكم بها وتحتاج إلى محولة كهربائية خارج المبنـــى وهذا يتطلب أموالاً إضافية .

تعتمد الافران الكهربائية بالأساس على مقدار التحول في الطاقة الكهربائية الى طاقة حرارية حسب مقدار الجول الذي يعتمد على مقدار الضياع في الطاقة الكهربائية نتيجة مرور تيار كهربائي I في المقاومة الكهربائية r حسب قانون اوم حيث فولتية المصدر v تحسب من العلاقة التالية:

$$V = I R$$

والقدرة الكهربائية P تعطى بالعلاقة :

$$P = V I = I R^2$$

وهي تعتمد على مقدار المقاومة الكهربائية اما الطاقة الكهربائية Q والمتحولة الى طاقة حرارية وتحسب من العلاقة:

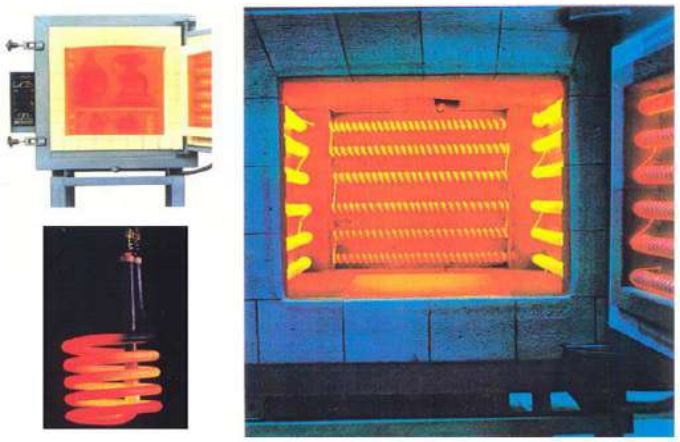
$$Q = P.t = \rho \frac{l}{A} I^2.t$$

حيث t الزمن ، ρ المقاومة النوعية لسلك التسخين، l طول السلك A مساحة المقطع.

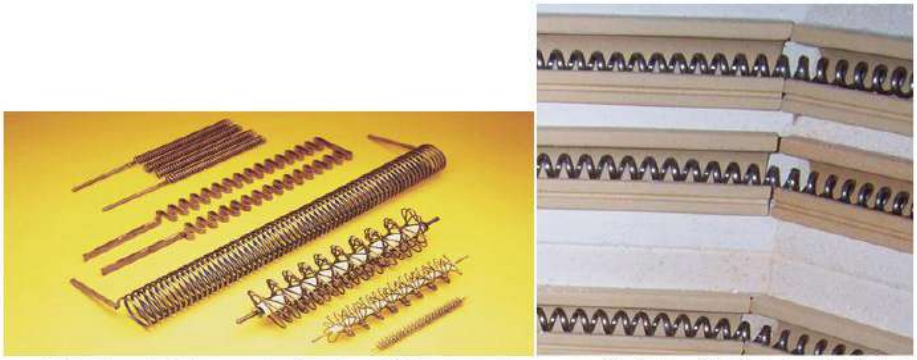
ومن امثلة الافران التي تعتمد على الطاقة الكهربائية هي تلك التي يكون عنصر التسخين فيها من الكربون (الكرافيت) ، سبائك خاصة، كاربيد السليكون..... الخ
ومن فوائد ومميزات أفران التسخين الكهربائي:

1- **سهولة قياس القدرة الداخلة الى الفرن.**
2- **سهولة السيطرة على معدل التسخين ودرجة الحرارة**
3- **تعمل في الجو الاعتيادي وتعتمد على مصدر التسخين (لا تستعمل الافران ذات عناصر التسخين من الكرافيت في جو مؤكسد)**

يمكن ان تكون كلفة الأفران الكهربائية أعلى من الأفران الاخرى مثل الغازية او التي تعتمد على النفط.



توزيع الحرارة داخل الفرن الكهربائي



انواع مختلفة من اسلاك تسخين الافران (الكنثال)

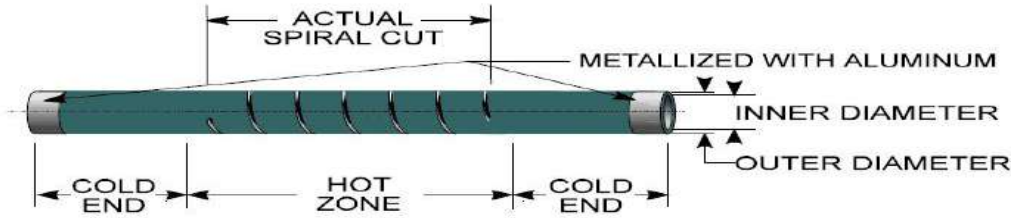
اسلاك التسخين الكنثال داخل الفرن

شكل (3-1) تصاميم وأسلاك تسخين الأفران الكهربائية

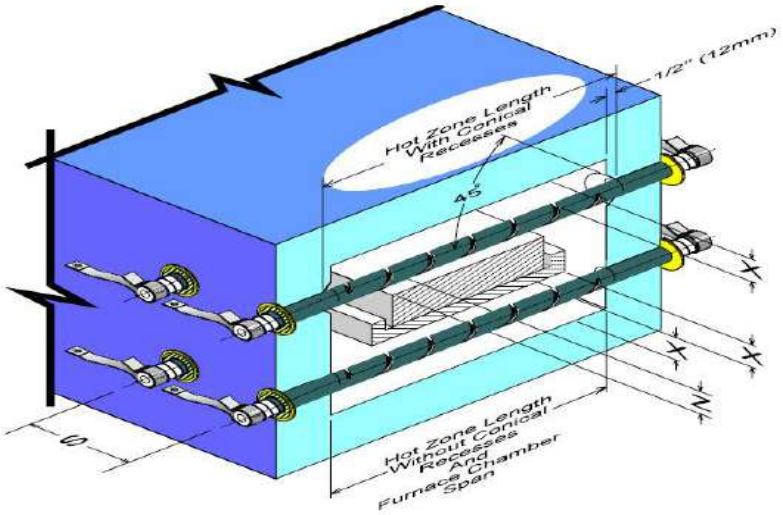
(3-2-2) الأفـــران ذات الأعمـــدة الكهربائيـــة :

وهي افران ذات اعمدة متكونة من كاربيد السيليكون (SiC) شكل (3 – 2) تسمى (القضبان المتوهجة) كمولدات للحرارة بدلا من الأسلاك وهي تحتمل الاستعمال لدرجات الحرارة العالية ومثال ذلك الحرارة اللازمة لتســـويـة البورسلين .

هذه الأفران متينة البناء وتتحمل احمالاً كبيرة ولكنها اغلى ثمنا بكثير من افران الأسلاك التي فـــي حجمها وذلك بسبب ما يتكلفه انشاؤها وكذلك لضرورة امدادها بمنظم للحرارة. ويمكن ان تصل درجة حرارة الفرن التشغيلية الى (1500 ^{o}C).



عنصر تسخين من كاربيد السيليكون



تصميم فرن مؤلف من عناصر تسخين كاربيد السيليكون



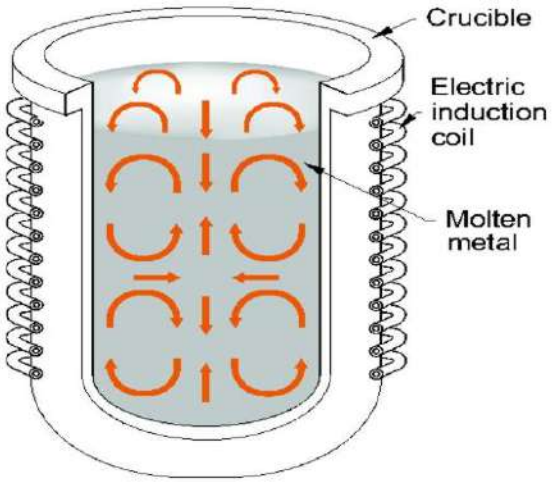
توهج منطقة التسخين في قضبان التسخين من كاربيد السليكون

شكل (3-2) الأفران ذات أعمدة التسخين المصنعة من كاربيد السيليكون

(3-2-3) الأفران الحثية indirect Heating

تعتمد فكره مرور التيار الكهربائي عالي في ملف يحيط بالعينة السيراميكية فينشا عن الملف مجال مغناطيسي يولد تيارات كهربائية دوامه شكل (3-3) داخل الجسم السيراميكي وهذه التيارات تولد حرارة في الجسم. ومن محدوديات هذه الافران انها تستعمل الأجسام الخزفية ذات التوصيل الكهربائي وبما ان معظم الأجسام الخزفية هي عازله كهربائيا لذلك فتوضع الاجسام داخل بودقه من

الكرافيت وتتم العملية في جو مفرغ من الهواء لمنع تأكسد البودقة. وغالباً ما تستخدم الافران الحثية في صهر المعادن.



شكل (3-3) نشوء التيارات الدوامة في الافران الحثية

(4-2-3) أفران المصانع الصغيرة

تستخدم هذه الأفران للمصانع الصغيرة التي يديرها عدد قليل من العمال وحجمها لا يقل عن متـــرين مكعبين وعمقها متران شكل (4-3) ولسهولة التعبئة تكون قاعدة الفرن متحركة وتجلس على عجلات حديدية تشبه عجلات القطار تسحب خارج الفرن وتستقر على عربة في الأمام ، تتحرك على سكة حديدية بسهولة الـى اليمين واليسار والأمام والى جانب الفرن وتعبأ بسهولة بالإنتاج بالدوران حول العربة وبالإمكان ملاحظـة وضع القطع من جميع الأماكن وسهولة مشاهدتها في حالة ملامستها بعضها لبعض وخاصة للإنتاج المزجج وبعد التعبئة تدفع العربة الى داخل الفرن بسهولة ويتم توصيل العربة بالكيبل الخاص بها لتغذيـــة اسلاكها الحرارية بالكهرباء .

تجهز مثل هذه الأفران بعربتين الاولى في الداخل والثانية امام الفرن في الخارج تعبأ بالإنتاج وتكـــــون جاهزة لليوم الثاني ، كما يوجد نوع آخر من الأفران قاعدته ثابتة على الأرض وهيكل الفرن هو المتحرك الى الخلف او الى الاعلى حيث يرفع هيكل الفرن كاملا برافعات خاصة الى الاعلى ويبقى معلقا عند التعبئـــة والتفريغ ، وضع هذا التصميم لتلافي اهتزاز الانتاج في الأفران ذات العربات المتحركة .



شكل (3-4) أفران المصانع الصغيرة

(3-2-5) الأفرن المستمرة :

وهي افران الإنتاج الصناعي والتجاري الكبير مثل ادوات المائدة كالصحون والأكـــواب وغيرهـــا وكذلك الأدوات الصحية مثل المغاسل والحمامات وكاشي تغليف الجدران . وهي تشبه النوع الثانـــي ولكنها اكثر عمقا وتستوعب عشرين عربة او اكثر ونفس العدد خارج الفرن معبأ بالإنتاج الجاهز للدخول الى الفرن الواحدة تلو الأخرى تشبه القطار ، تتقدم العربات داخل الفرن آليا ببطء ، حيث مركز الحرارة فـــي الوسط فقط ويأخذ الإنتاج الحرارة بالتدريج في اثناء تقدم العربات ليصل الى مركز الحرارة في الوسط حيـــث ينضج الإنتاج وتستمر بالتقدم لتخرج ببطء من مركز الحرارة وتبدأ الحرارة بالهبوط التدريجي ايضا وهي مستمرة بهذه الحركة لتصل الى خارج الفرن بعد انخفاض حر ارة الإنتاج في الداخل يعقبها دخول عربـــة آخري من الجانب الآخر ، علما ان هذا النوع من الأفران بدون ابواب مفتوحة الجانبين تغلقه العربـــات المحملة بالإنتاج ، ويوجد عمال لتفريغ العربات الخارجة وآخرون لملء العربات للدخول وهذه الأفـــران لا تتوقف عن العمل ومستمرة ليلا ونهارا ولكي تكون اقتصادية يكون وقودها الغاز او النفط الأبيض حـيث يضخ بواسطة اجهزة مع الهواء المضغوط لتكون عملية الاحتراق كاملة وبدون دخان كثيف وتكون لـــهذه الأفران فتحات مراقبة على جانبي مركز الحرارة لمواكبة سير درجات الحرارة والنضوج ، يدير مثل هـــذه الأفران اخصائيون مهرة وان جميع الدول المتقدمة صناعيا تستعمل مثل هذه الأفران ، والفرن المســتمر ما

هو الا نفق طويل مملوء بالعربات المحملة بالإنتاج . وقد طورت الأفران لكي تعمل بالطاقة الكهربائية لتقليل التلوث البيئي.

مميزات الأفـــــــران المســـتمرة :

الافران المستمرة تمتاز بدرجات حرارة ثابتة تعبرها القطعة الخزفية بمعدلات ثابتة ،ومن اهم مميزاتها :

1- الحرارة المفقودة يتم استغلالها في التسخين الأولي للمنتجات .
2- تستعمل الحرارة المفقودة في اثناء عملية التبريد في التسخين الأولي لغاز الاحتراق او زيت الوقود .
3- هناك امكانية للسحب والتعبئة بسهولة .

ومن اشهر انواع الأفران المستمرة ما يأتـي :

1. الفـــــرن الـــــدوار :

هو عبارة عن غلاف اسطواني من الصلب يدور ببطء حول محور مائل بضع درجات عن الوضع الأفقي بحوالي ($4^{o}C$) ويصل طول هذا النوع من الأفران الى (75 m) وقطره حوالي (6m) شكل (3-5) ، يتم ادخال المادة لخام المحضرة من الطرف الخلفي العلوى له حيث تتحرك بسبب الانحدار وعدد دورات الفرن إلى الطرف الأكثر حرارة ، وفى هذا الطرف المنخفض يتواصل انتقال اللهب بواسطة حقن الوقود عبر انبوبة احتراق يمر فيها الهواء إلى داخل الفرن ثم يمتص بواسطة مروحة مثبتة خلف الفرن ويستخدم نوعين رئيسيين من الوقود هما الزيت الثقيل والغاز الطبيعي.



شكل (3-5) الافران الدوارة

2. الفرن العمودي :

لقد كانت الافران العمودية شائعة الاستعمال في البلدان الاوربية منذ مدة طويلة وانتشرت اليوم انتشارا واسعا في البلدان الأخرى خاصة بعد أن تطورت هذه الافران بهدف تقليص استهلاك الوقود فيها إلى الحد الادنى ويتبين أن مجموع مزايا الفرن العمودى تفوق مزايا الفرن الدوار ذى المسخن الأولي من الناحيـــــــة الاقتصادية الا انه يجب أن يؤخذ في الاعتبار بأن نوعية المنتج النهائي بالنسبة للفرن الدوار تفوق إلى حد كبير نوعية المنتج النهائي للأفران العمودية.



شكل (3-6) الأفران المستمرة

درجة المقارنة / الفرن	العمودي	الدوار
1 . التكلفة	اقل	اعلى
2. استهلاك الكهرباء	17-16 kW / h - ton المنتج	21-20 kW / h - ton المنتج
3. وزن المعدات	4500 – 3500 ton	4500 ton
4. المساحة	يحتاج إلى مساحة اقل لان الفرن في وضع عمودي	يحتاج إلى مساحة اكبر لان الفرن في وضع افقي
5. استهلاك الحرارية	يستهلك كمية اقل	يستهلك كمية اعلى
6. المواد الخام المستخدمة	لا تستعمل الاحجار الناعمة بل تزيد عن50 - 120 mm	تستعمل الاحجار الناعمة

مقارنة بين الفرن الدوار والفرن العمودي

3. الفرن النفقـــي :

يتضح جليا بأن أستعمال الافران الدورية لغرض إنتاج كميات كبيرة بأنها غير اقتصادية ومكلفة جدا وبناء على ذلك ظهرت عدة محاولات لتصميم أنواع أخرى من الافران لتغطى العديد من العيوب التي ظهرت في الافران الأخرى ، ويعد تصميم (هوفمان) أول تجربة ناجحة بالنسبة للأفران المستمرة حيث يتحرك فيها مصدر الحريق على المواد المراد حرقها غير أنه قد ظهرت على هذه الفكرة بعض العيوب من ضمنها عدم اعداد برنامج حريق دقيق ، وظهرت محاولات أخرى جديدة اخرها الافران النفقية شائعة الاستعمال شكل (3-7) التي يتم بها تحريك المواد أو نقلها وحرقها على عربات خاصة على مصدر الحريق.

نورد فيما يأتي اهم انواع الافران النفقية المستمرة :

1- الأفران اللازمة لمنتجات الطين الثقيلة .. من بين المنتجات التي يتم حرقها فيه:

- **الطوب .**
- **بلاط السقوف .**
- **بلاط الارضيات .**
- **انابيب الصرف الصحي .**

وتوجد العديد من التصميمات لهذا الغرض كما انها تستعمل اشكالاً مختلفة من الوقود مثل الزيت الخفيف والغاز . وتتراوح درجة الحرارة في هذه الافران ما بين (^{o}C 800-1200) وهي تعتمد على نوع المنتج المراد حرقه ، ويصل عمر الفرن قرابة عشرة اعوام ، ويتميز بانه عبارة عن حوائط عمودية متصلة باسقف مقوسة تشكل في مجموعتها نصف دائرة .

2 - الأفران للمنتجات الخزفية.. مثل البورسلين ، بلاط الجدران ، المواد الصحية ، وتتراوح درجة الحرارة ما بين (^{o}C 850-1300) وهو يعتمد على المنتج النهائي والمواد الخام .

مميزات الفرن النفقي

1- يستعمل في حرق أي نوع من المواد مثل حرق البسكويت وحرق الطلاء

2- إمكانية التحكم بدقة في برنامج الحريق بدرجة تفوق أي برنامج في الافران الأخرى.

3- يمكن تصميم الفرن بحيث يتلاءم مع أي حجم أو مع أي نوع من الإنتاج.

4- استهلاكه للطاقة يقل كثيرا عن مثيله من الافران الأخرى.

5- يمكن الاستفادة من الحرارة الضائعة في عملية التجفيف.

6- يحتاج إلى عمالة قليلة مقارنة بالأنواع الأخرى من الافران.

7- يحتاج إلى تكلفة صيانة أقل .



شكل (3-7) الفرن النفقي

(3-2-6) أفران الوقـود :

وهي الأفران التي يكون النفط الابيض او الأسود او الغاز مادة وقود الاحتراق وصولا فيها لدرجة الحرارة المطلوبة ومثل هذه الأفران لها تصاميم خاصة لتلائم لهب ألسنة النار المتوهجة ، والأفران يجب ان تكون لها مداخن عالية اعلى من غرفة الاحتراق ليتكون تيار سحب الى الأعلى لزيادة الاحتراق وارتفاع فـي درجات الحرارة والكثير منكم شاهد معامل الطابوق ومداخنها العالية ، اما الأفران الغازية فلا تحتاج الى اي مداخن بهذا الارتفاع بسبب شدة احتراق الغاز وسرعته .

افران الوقود منتشرة بكثرة في العراق لإنتاج الخزف او الفخار الشعبي وتسمى محليا (الكورة) ومن هذه الإنتاجات الكاشي الكربلائي لتغليف جدران وقباب المساجد وكذلك البساتيك وجرار تبريــد الماء والحبوب وسنادين الشتلات النباتية وغيرها ، اغلب الخزافين يستعملون الفرن ذا التيار النازل حيث يخرج تيار النار من قاعدة الفرن في الوسط ثم يصدم بسقف الفرن المقوس ليتوزع تيار النار على جميع قطع الإنتاج ليتوجه من خلالها الى قاعدة الفرن ليخرج من المداخن الاربعة الى الأعلى خارج الفرن كما هو موضح في الرسم شكل (3-8) ولجميع هذه الأفران سقف مقوس ليجعل النار الصاعدة على شكل النخلة في الداخل تمتاز افران حرق الوقود بأنها رخيصة التكاليف بالنسبة لا نتاجها وتكاليف صيانتها وأدامتها اقل من الأفران الكهربائية وكذلك تحتاج عملية تشغيلها الى خبرة واسعة حيث لا يتمكن الخزاف المبتــدئ من الوصول اليها الا بعد مدة عمل طويلة ورغم كل هذا لأفران الوقود سلبيات هي :

1- أفران مشيدة على الأرض لا يمكن نقلها الى مكان آخر .

2- أنها افران ملوثة للبيئة ، بسبب الدخان والأبخرة الضارة بالصحة .

3- تحتاج الى خبرة واسعة لتشغيلها .

4- يحتاج بناؤها الى أماكن واسعة ومكشوفة للتخلص من الدخان والأبخرة .

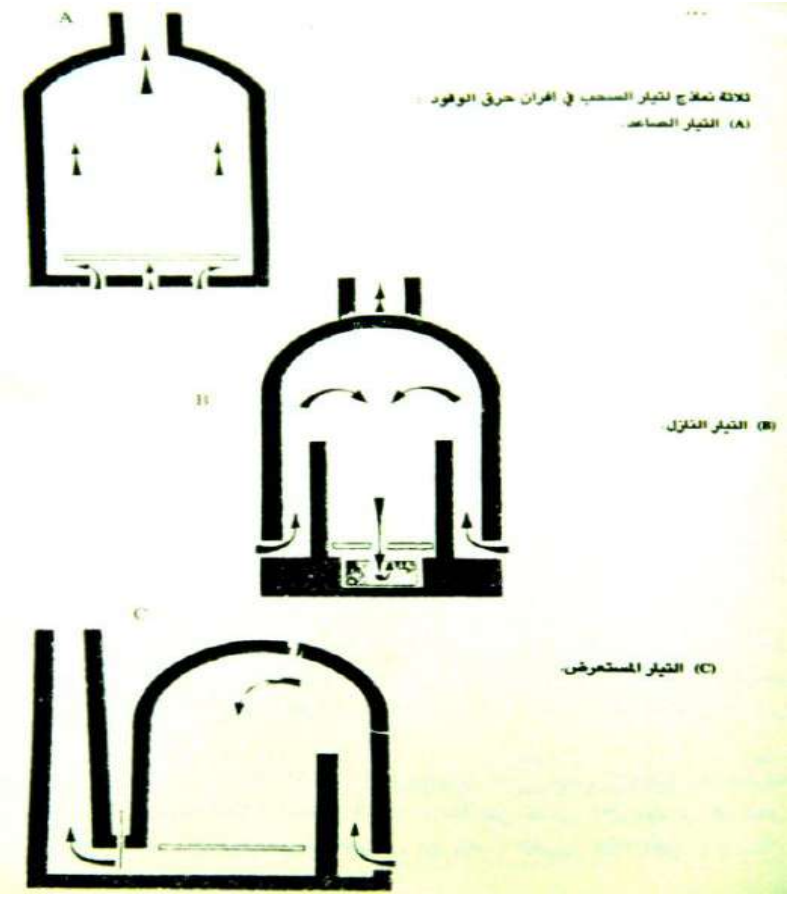
اشكال افران الوقـــــــود :

افران الوقود ثلاثة بالنسبة الى طريقة بنائها كما موضح في الرسم .

1- فرن التيار النازل

2- فرن التيار الصاعد

3- فرن التيار المستعرض



شكل 3-8 أفران الوقود

أنواع أفران الوقود:

1- فرن حرق نشارة الخشب :

وهو فرن ذو تصميم جدا بسيط لفخر الأوعية وهو في الحقيقة لا يتقدم على الطرق البدائية في استعمال النار المفتوحة الا بمرحلة واحدة .

يتوجب صنع الأوعية التي تفخر في فرن نشارة الخشب من طين مسامي البنية يحتوي على الرمل او مسحوق الفخار وينبغي تجفيفها جدا قبل الفخر .

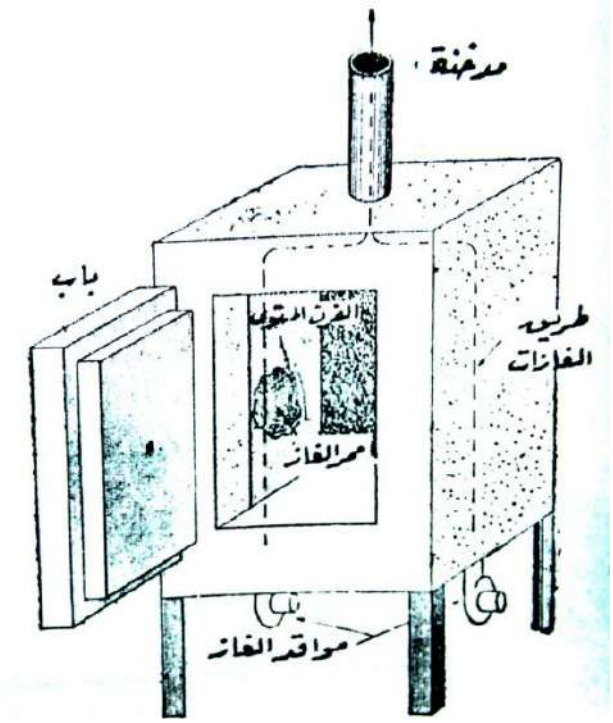
يشيد الفرن في حوالي ثمانين طابوقة عادية ولا تستعمل ملاطا او مانعا تسرب غازات بين الطابوق تترك فتحة عرضها حوالي نصف انج لدخول الهواء ، واذا كان الفرن في مكان مستور جدا فقد يكون من الضروري زيادة سعة الفتحات بين الطابوق الى اكثر من نصف انج .

2- فـرن الراكـو :

وهو فرن مدور صغير يوقد بفحم الكوك او بوقود عديم الدخان ، تقع الحاوية في قلب الفرن ويكون الجدار الرئيسي مظهره الجانبي ، وقد تشيد الجدران من الطابوق العادي لفرن مؤقت اومن الطابـوق النـاري لفرن دائم . يستعرض بطن الفرن عدد من القضبان النارية التي تسند الحاوية وتحتوي على النار قد يستعمل نفق دخول الهواء المثلث الشكل لتوجيه النار من صمام لهب الى مركز الفرن اذا رغب في عملية فخر سريعة وقد يوقد الفرن اما بالخشب او فحم الكوك يضافان بالتدريج من الاعلى او بصمام لهـب ومدخنة الفرن هي وعاء مدخنة بخاري للفخار . ويتم عزل الفرن كله بسدة ترابية قد يلاحظ تقدم حـــرق الزجاج في الحاوية في اوقات متعاقبة من خلال انبوب المراقبة المصنوع من معدن او طين . يصل الفــرن درجة التزجيج من (2-3) ساعات .

3- الأفـــــــران الغازيـــــــة:

وهي الأفران التي يكون وقودها الغاز والتي يجب ان تكون من النوع ذي الصــندوق وذلــك حتــى لا يصطدم الغاز المشتعل بالمشغولات ويوضح الشكل (3-9) الرسم



شكل (3-9) رسم تخطيطي للفرن الغازي

التخطيطي نوعاً من هذه الأفــران ذات الـصـندوق. وعندما تكون هذه الأفران مصممة تصمـيما صحيــحا يمكن الوصول بها الى درجة (1450 ^{o}C) وهي تعطي حرارة متعادلة في كل انحاء الصندوق وتبنى لاستعمالها بالرص من الجوانب اومن اعلى .

ويتراوح حجم فرن الغاز من (1 الى 30) قدما مكعباً ، والأفران الصغيرة منها تكلف اكثر من المماثلة لها في حجمها المعدة بالأسلاك الملفوفة اما الأكبر حجما فتقل تكاليفها تقريبا عن المماثلة لها من المعدة بالأسلاك ،وقد تكون ولاعتها (ترمسها) التي يوقد بها من النوع الذي يوقد بالهواء المضغوط للأفران الكبيرة وللحرارة الاعلى ، ويمكن استخدام غاز المدينة العادي او الغاز المعبأ في زجاجات الا انه يجب اعداد الولاعات (الترمسة) لتناسب نوع الغاز ، وتحتاج معظم افران الغاز الى مدخنة لسحب الغاز وهذه الغازات عادة ما تكون اسخن من غازات السخانات او المدافـىء

وباختصار فأن أفران الغاز يمكن استخدامها للحرارة العالية وليست باهظة التكا ليف في ادارتها ولكنها تحتاج الى مدخنة فحسب .

ولما ينجم عن استخدامها من حرارة تصبح غير مريحة في فصل الصيف وبصفة خاصة في المصنـــع الصغير .

4- الأفـــــــــــــران التي توقد بالزيـــــــت :

تستعمل هذه الأفران كما تستعمل افران الغاز ولكنها تحتاج الى انتباه اكثر في اثناء عملية الحريق كما أنها ليست نظيفة ولا يسهل التحكم فيها ، الا انها ناجحة جدا في المناطق التي لا يتوفر فيها الغاز .

(3-3) قياسات الأفـــران وحجومـــها :

تقاس الأفران دائما من الداخل لمعرفة حجومها وليس من الخارج أو بمعنى آخر تقاس ابعاد غرفة الاحتراق التي توضع فيها الإنتاجات وهي العرض والعمق والارتفاع وهذه الأبعاد المهمة جدا للفرن ولها علاقة بعضها ببعض وتبنى الأفران على اساس هذه العلاقة المهمة للحصول على فرن متساوي الحرارة في كل مكان من الفرن من الجهات الأربعة وكذلك توزيع الأسلاك الحرارية داخل الفرن حيث توجد افران فيها اسلاك على الجانبين فقط وآخري على الجانبين والقاعدة وآخري خمسة جوانب (الجانبين والقاعدة والباب وظهر الفرن في الداخل).

وعموما لا يفضل ان يكون قياس العرض هو اكبر القياسات لأن النقطة في وسط الفرن تكون بعيدة عـــن اشعاع الأسلاك الحرارية للجدارين الأيمن والأيسر وبالتالي ستكون درجة حرارة الفرن في الوسط هـــي الأقل من بقية الأماكن لذلك لا يجوز ان يكون بناء الفرن اعتباطيا لأن القياسات وضعت بعد تجارب طويـلة حتى تم التوصل الى الصناعة الأفضل .

(4-3) طـــرق قياس درجة حرارة الأفـــــــران :

تقاس حرارة افران الخزف بثلاث طرق هي :

1- تقاس الحرارة بواسطة البايرومتر (العداد) والمزدوجة الحرارية شكل (3-10).

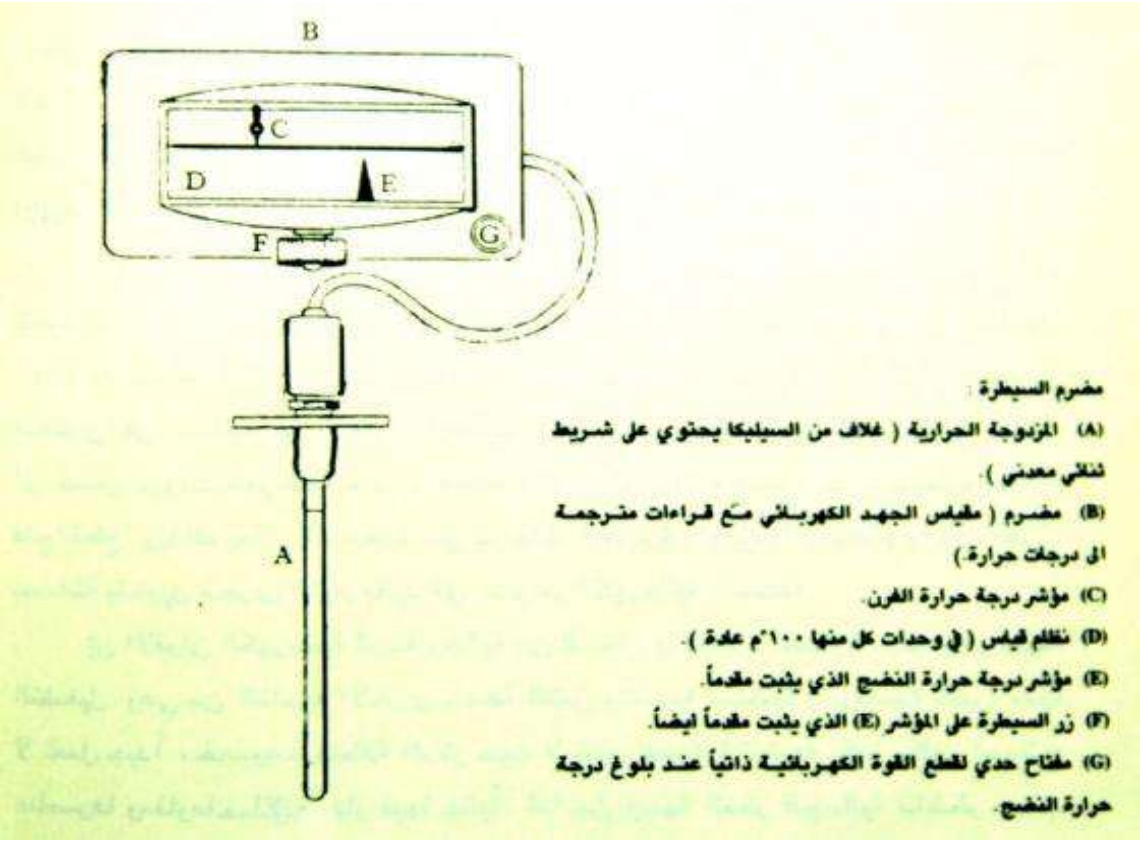
2- تقاس بواسطة الأهرامات الحرارية (اهرامات سيجر) شكل (3-11) مخترعها العالم الألماني سيجر وسميت برقم يرمز الى درجة حرارة معينة توضع هذه الأهرامات داخل الفرن مع الانتاج امام فتحة المراقبة في باب الفرن بحيث يمكن مشاهدتها من فتحة المراقبة عند غلق باب الفرن ، تثبت الأهرامـــــات الحرارية بقاعدة مستطيلة من الفخار تحمل ثلاثة اهرامات الأول من اليمين ودرجة حرارته(^{o}C 930) والثاني (^{o}C 950) والثالث (^{o}C990) ، والدرجة المطلوبة هي (^{o}C950) الهرم الأوسط وعند ارتفاع درجة الحرارة يميل الهرم الأول نحو القاعدة وهذا يعني حرارة الفرن (^{o}C 930)اما الهرم الثاني لم يتحرك بعد وعند ارتفاع درجة الحرارة الى (^{o}C 950) وهي الدرجة المقصودة يميل الهرم الثاني وفي هذه النقطـــة يجب اطفاء الفرن فورا ويبقى الهرم الثالث واقفا بدون ميلان كما هو واضح في الصورة ومن هـــذا يتبين ان الهرم الأوسط هو المطلوب والأول والثالث للمقارنة وضبط الحرارة الصحيحة .

3- تقاس بواسطة النظر ، تقدير درجة الحرارة عند النظر داخل الفرن عن طريق فتحة المراقبة بملاحظة لون الحرارة داخل الفرن وهذه الطريقة تعتمد اساسا على خبرة الشخص المراقب التي اكتسبها خلال مدة طويلة بمراقبة الأفران ولون الحرارة داخل الفرن من البداية وفي اثناء التقدم بالارتفاع وعند النضوج والوصول للحرارة المطلوبة وهي الطريقة الأولى والأقدم لتقدير درجة الحرارة ، ويمكن مشاهدة الحرارة بالصورة التالية وتقديرها

كما يلـــــي :

لون الحرارة داخل الفـــــرن	درجة الحرارة (درجة مئوية)
اسود بلا ضوء	400
اول حمرة يمكن رؤيتها	475
احمر داكن	650
احمر برتقالي	900
برتقالـــــي	1000
اصفـــــر	1090
اصفر مبيـــض	1300

شكل 3-10 المزدوج الحراري



مضرم السيطرة :

(A) المزدوجة الحرارية (غلاف من السيليكا يحتوي على شريط ثنائي معدني).

(B) مضرم (مقياس الجهد الكهربائي مع قراءات مترجمة الى درجات حرارة)

(C) مؤشر درجة حرارة الفرن.

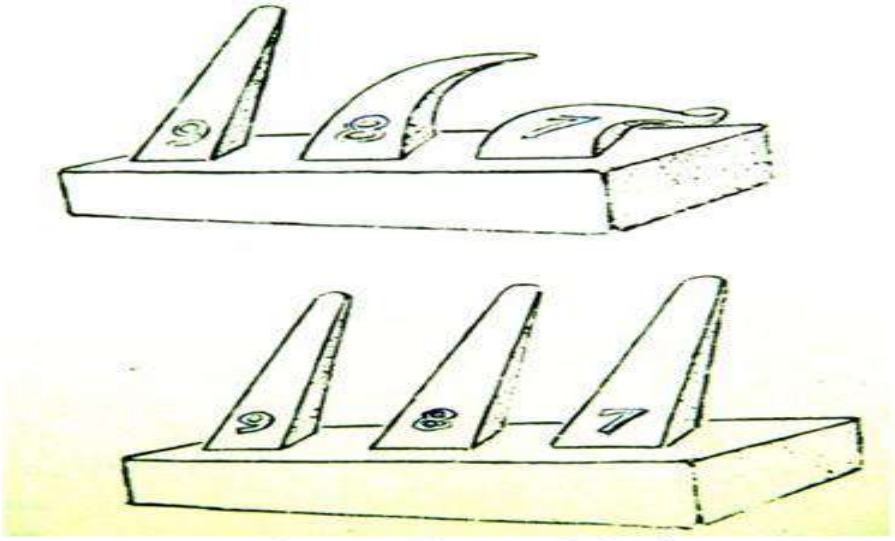
(D) نظام قياس (في وحدات كل منها ١٠٠°م عادة).

(E) مؤشر درجة حرارة النضج الذي يثبت مقدماً.

(F) زر السيطرة على المؤشر (E) الذي يثبت مقدماً ايضاً.

(G) مفتاح حدي لقطع القوة الكهربائية ذاتياً عند بلوغ درجة حرارة النضج.

الشكل (3-10) المزدوج الحراري



اهرامات (مواشير) سيكر

شكل (3-11)

هل تعلم !!!

إن هناك أفران مفرغة من الهواء تستخدم لأغراض خاصة تتطلب عدم وجود الهواء أو الأوكسجين لتقليل تأثيرات الأكسدة على المنتجات خصوصاً تلك التي تحتوي على مركبات الكربون.



(5-3) الوقود (Fuels)

لقد استخدمت مركبات الكربون والهيدروجين منذ مئات السنين كمصدر للوقود والطاقة وذلك راجع في الأساس إلى إن التفاعل الكيميائي يولد حرارة ، ويعتبر الوقود الكيميائي مادة قابلة للحرق تحتوي على الكربون كمكون رئيسي ، ولذلك يعطي عند حرقه كمية كبيرة من الحرارة تستعمل على نطاق واسع لمختلف الأغراض الصناعية .

وقد استعمل الوقود الكيميائي كمصدر لتوليد الحرارة في باديء الأمر ثم تطور فيما بعد لتلبية متطلبات هامة أخرى ، وعلى سبيل المثال يستعمل الفحم في الصناعات المعدنية ليس كمصدر حرارة فقط بل كعامل مختزل .

(3-5-1) تقسيم الوقود

تقسم الأنواع المختلفة للوقود وفقا للاتي :-

1. التواجد والتحضير ، ويندرج تحت هذا النوع :

a– وقود أولي أو طبيعي ومن أمثلة ذلك الخشب ، الفحم ، الغاز الطبيعي وغيرها من المواد التي تتواجد طبيعيا .

b– وقود ثانوي أو صناعي ، حيث يتم تحضير هذا النوع من الوقود الأولي من أمثلة ذلك الكيروسين ، غاز الفحم الديزل وغيرها من المشتقات النفطية .

2- وفقا لطبيعة التجمع ، يعتمد هذا النوع على ظروف تجمعها حيث يقسم إلى وقود صلب ، وقود سائل ، وقود غازي .

وبناء على ما تقدم يمكن تصنيف الوقود كما يلي :-

على حساب طبيعة التواجد	طبيعي (أولي)	صناعي (ثانوي)
الوقود الصلب	خشب / فحم	فحم كوك / فحم حجري
الوقود السائل	البترول	كيروسين / ديزل / كحول
الوقود الغازي	غاز طبيعي	غاز الفحم

القيمة الحرارية :

من الخواص التي توضع في بالحسبان بالنسبة لأي نوع من الوقود ما يسمى بالقيمة الحرارية أو بمعنى آخر القدرة على توليد الحرارة وتعرف القيمة الحرارية بأنها (إجمالي كمية الحرارة الناتجة عن احتراق وحدة وزنية بالكامل من الوقود) .

وحدات الحرارة :

تستخدم الوحدات آلاتية لقياس كمية الحرارة :

1 – الكالوري (السعر cal) :- وهو كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة الحرارة غرام من الماء درجة مئوية واحدة .

2. الكيلوكالوري :- كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة (1kg) من الماء درجة مئوية واحدة .
3. الوحدة الحرارية البريطانية (BTU) :- وهي كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة رطل من الماء درجة فهرنهايت واحدة .
4. وحدة الحرارة المئوية (CHV) :- وهي كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة رطل من الماء درجة مئوية واحدة .

1 Kcal = 0.252 Cal = 252 BTU

1 Kcal = 3.968 BTU = 2.2 CHV

القيمة الحرارية العليا (H .C . V)

القيمة الحرارية السفلى (L .C .V)

لقد لوحظ بالتجربة إن الوقود يحتوي على بعض الهيدروجين عند تعيين القيمة الحرارية لهذه القيم معمليا فان الهيدروجين يتحول إلى بخار وإذا ما تم تكثيف ناتج احتراق إلى درجة حرارة الغرفة فان الحرارة الكامنة لعملية التكثيف يتم وضعها في الاعتبار وعليه فانه يمكن تعريف

القيمة الحرارية العليا على إنها (إجمالي كمية الحرارة الناتجة عن حرق وحدة بالكامل من الوقود وان ناتج الاحتراق قد تم تبريده إلى درجة حرارة الغرفة .

وتعرف القيمة الحرارية السفلى على أنها كمية الحرارة الصافية الناتجة عن حرق وحدة وزنية أو حجميه من الوقود بالكامل وان نواتج الاحتراق قد سمح لها بالتسرب .

مميزات وخواص الوقود المثالي :

لأجل إن يكون الوقود مثاليا فانه يتعين توفر الشروط الآتية :

1. **أن يكون له قيمة حرارية عالية .**
2. **أن لا تكون له نسبة رطوبة عالية .**
3. **أن يتوفر بسهولة وبتكلفة اقتصادية بسيطة .**
4. **أن يكون لـه درجـة اشـتعال متوسطة حيث إن درجـة الاشـتعال المنخفضـة تـؤدي إلـى خطورة عالية في حين إن درجة الاشتعال العالية تسبب صعوبة في إشعال الوقود .**
5. **سرعة الاحتراق يجب إن تكون متوسطة .**
6. **الاحتواء على اقل ما يمكن من الرماد .**
7. **سهولة النقل دون خطورة .**
8. **أن تكون له إمكانية تخزين بكميات كبيرة اقتصاديا.**
9. **أن لا يكون له ناتج احتراق ضار بالصحة.**
10. **أن يحترق في الهواء دون تصاعد دخاني .**
11. **أن يكون احتراقه سهل التحكم .**
12. **بالنسبة للوقود الصلب فان حجمه يفضل إن يكون متجانسا حتى يكون احتراقه منتظما.**
13. **أن لايكون له قدرة اشتعال ذاتية .**

(2-5-3) الأنواع المختلفة للوقود

1 . الوقود الصلب :

مميزات وعيوب الوقود الصلب :

المميزات :

1- درجة اشتعال متوسطة .
2- تكلفة انتاجية رخيصة .
3- امكانية تخزين كميات كبيرة .
4- امكانية نقل الوقود الصلب بسهولة .

العيوب :

1- كمية رماد عالية .
2- فقدان نسبة كبيرة من الطاقة .
3- أشتعال مع تكوين خبث او كلنكر .
4- عدم القدرة على التحكم في الاشتعال .

تأثير المكونات الاساسية للوقود الصلب :

1- الرطوبة :

بما إن الرطوبة المتواجدة في الوقود تتبخر في اثناء الاشتعال فان ذلك يعني ضمنيا فقدان جزء كبير من الطاقة في اثناء عملية التبخر وبالتالي فان ارتفاع نسبة الرطوبة يساهم إلى حد بعيد في خفض القيمة الحرارية للوقود .

2- المواد الطيارة :

إن ارتفاع نسبة المواد في الوقود الصلب يؤدي إلى الاشتعال بلهب طويل مع تصاعد دخان كثيف وعادة ما يؤدي ذلك إلى خفض القيمة الحرارية .

3- الرماد :

لقد لوحظ إن ارتفاع نسبة الرماد تقلل القيمة الحرارية مع امكانية تكوين خبث او انصهار فبذلك يساهم في ملء الفجوات او الفراغات واغلاق الفتحات الخاصة مؤدية إلى عدم انتظام عملية الحرق .

4- الكربون الثابت :

(الفقد في الوزن يعطي المواد الطيارة والوزن الباقي يعطي الكربون الثابت +رماد).

تساهم نسبة ارتفاع الكاربون بالنسبة للوقود الصلب في زيادة القيمة الحرارية للوقود وتحسين جودته وهذا امر مرغوب فيه .

5- الكربون والهيدروجين :

يتبين من خلال معادلة دولنج الخاصة بتعيين القيمة الحرارية إن ارتفاع الكربون والهيدروجين يساعد إلى حد بعيد في ارتفاع القيمة الحرارية وبالتالي تحسين جودة الوقود .

6- النتروجين :

ليس للنتروجين أي قيمة حرارية وبالتالي فان ارتفاع نسبته تعامل على انها نوع من الشوائب .

7- الكبريت :

على الرغم من إن ارتفاع نسبة الكبريت قد تحسن من القيمة الحرارية للوقود الا إن احتواءه نسبة من SO_3 , SO_2 . يكون له تاثير سلبي حيث يتفاعل مع الرطوبة مكونا H_2SO_4 .

8- الأوكسجين :

لفد ثبت أن ارتفاع نسبة الأوكسجين في الوقود بنسبة 1% تقلل من القيمة الحرارية بواقع 1.7 % وبالتالي فان ارتفاع هذه النسبة امر غير مرغوب فيه .

أهم أنواع الوقود الصلب :

1. الخشب WOOD

يمكن الحصول على الخشب بكميات كبيرة من الغابات ، ولقد لوحظ إن الخشب الطري او حديث القطع يحتوي على نسبة رطوبة بين 20 إلى 25 % يمكن خفضها بنسبة 15 % بواسطة التجفيف في الهواء .

وفي جميع الاحوال فان متوسط تركيب الخشب الجاف كالاتي :

كربون 50% ، هيدروجين 6% ، اكسجين 43% .

والمتبقي رماد . وتصل القيمة الحرارية

4500- 3500 Kcal / 1kg

2. الفحم COOL :

يعد الفحم من مشتقات الخشب والمواد النباتية الاخرى التي تم تحللها بواسطة البكتريا وتحور بعد ذلك بواسطة الحرارة والضغط لمدة زمنية طويلة ، وقد ادى ذلك إلى وجود انواع مختلفة من الفحم .
وقد ساهم التغيير من الخشب إلى الفحم إلى المزايا التالية :-

1. **أرتفاع نسبة الكربون .**
2. **زيادة في الصلابة .**
3. **أنخفاض في نسبة الاكسجين .**
4. **أنخفاض في نسبة الرطوبة .**
5. **أنخفاض في نسبة المواد الطيارة .**
6. **أرتفاع القيمة الحرارية .**

3. الوقود السائل :

يتضمن الوقود السائل الزيوت والقطران والزفت وهي مشتقة من المصادر الاتية : -

البترول ، الصفائح الزيتية ، الفحم المكربن ، الفحم المهدرج.

تركيب البترول يتراوح ما بين 87-81 % كربون 13% من الهيدروجين 3.1% كبريت، وربما 5.0% نيتروجين واوكسجين.

مميزات الوقود السائل :-

1) **له قيمة حرارية عالية تفوق القيمة الحرارية المتواجدة في الوقود الصلب .**
2) **يحترق دون تكوين غبار او رماد .**
3) **يمكن التحكم في اشعاله بسهولة وذلك يوقف تدفق السائل .**
4) **يمكن نقله بسهولة عبر انابيب .**
5) **يمكن تخزينه لمدة طويلة .**
6) **تقليص العمالة في تشغيل الافران .**
7) **استعماله نظيف وتكلفته الاقتصادية جيدة .**
8) **يحتاج إلى كمية هواء اقل في اثناء الاشتعال وكذلك لمساحة افران اقل .**

عيوب الوقود السائل :

تتم عبر طريقتين :

- **يتم تبخير الوقود السائل اولا ومن ثم اشعاله مثل الغاز .**
- **تفتيته او تحطيمه على هيئة قطرات صغيرة بحيث تحقن فيما بعد الهواء الساخن حتى تتبخر في اثناء عملية الحريق فبالنسبة للحالة الاولى فان المعدات المستعملة غالبا ما تكون مشابهة للمواقد العادية كما إن زيت الوقود المستعمل يجب إن يكون طيارا اما في الحالة الثانية فانه غالبا ما يستعمل الزيت الثقيل حيث يتم تسخينه اولا إلى إن يصبح ذا لزوجة معينة ثم يرش بعد ذلك .**

4. الوقود الغازي

المميزات :

1) **يمكن نقله بسهولة لمسافات بعيدة عن طريق الانابيب .**
2) **قيمته الحرارية عالية حيث إن مكوناته الاساسية عبارة عن مركبات هيدروكربونية .**
3) **يمكن ايقاف تدفقه في المحطات .**
4) **يمكن السيطرة بسهولة على اشتعاله .**
5) **يشتعل دون ترك رماد او دخان .**
6) **استعماله نظيف .**
7) **ليس لديه مواقد خاصة .**
8) **يمكن انتاجه بسهولة حيث إن معظمه يعتمد على الغاز الطبيعي .**

العيوب :

1) **يحتاج إلى حزانات كبيرة للتخزين .**
2) **قابلية اشتعاله سهلة وبذلك تكون هناك خطورة اكبر على الحريق .**

تقسيم الوقود الغازي :

يوجد الغاز في عدة مصادر:

1) **طبيعيا في الزيت واماكن تواجد الفحم .**
2) **من مصانع الكربنة .**
3) **من مولدات الغاز ومن الفحم**
4) **من اتلاف الزيوت (Cracking of oils) .**
5) **من تحلل بقايا المجاري بواسطة البكتريا .**

واهم الانواع هو الغاز الطبيعي .

5. الغاز الطبيعي :

وهو يمثل خليطاً من الهيدروكربونات وبصورة رئيسية الميثان (CH_4) ، الايثان (C_2H_6) ، البروبان والبيوتان وكميات قليلة من الهيدروكربونات السائلة ، ويعتبر الغاز الطبيعي مصدرا هاما من مصادر الطاقة بل من اهم مصادرها على الاطلاق وهو يوجد على نوعين :

1) الغاز الحر : ويوجد في حقول حرة تحت اعماق الارض ويكون في اغلب الاحيان من النوع الجاف .
2) الغاز المصاحب : ويظهر هذا النوع من الغازات في اغلب الاحيان مصاحبا للبترول عند استخراجه من باطن الارض ويفصل في محطات فصل الغاز .

الغاز الطبيعي عادة يحتوي على 90 جزءاً من الميثان ، 5 - 6 اجزاء من الايثان ، بروبان ، بيوتان ، كميات قليلة من CO_2 , N , H_2S .

وفي بعض انواع الغازات قد ترتفع نسبة CO_2 , H_2S وفي جميع الاحوال لابد من التخلص من H_2S وتخفيض نسبة CO_2 وذلك للحفاظ على القيمة الحرارية العالية .

اسئلة الفصل الثالث

1- مم تتكون الأفران الكهربائية ؟
2- على ماذا تعتمد قياسات الأفران وحجومها ؟
3- ماهو الفرن المستمر وكيف يعمل ؟ اشرح ذلك .
4- عرف مايأتي :
الفرن الدوار - فرن حرق يعمل بالزيت - الفرن ذو الأعمدة الكهربائية - فرن الراكو
5- اجب بكلمة صح او خطا ثم صحح الخطا ان وجد .
أ - يوجد الغاز الحرفي في حقول فوق سطح الارض
ب- الافران ذات الاعمدة الكهربائية هي افران ذات اعمدة متكونة من كاربيد السيليكون (sic
(6- ارسم مخططا لأحد الأفران يعمل بالوقود .
7- تكلم بشكل مفصل عن اهرامات سيجر
8- ما الألوان التي تعطيها درجات الحرارة في فرن الخزف :

الفصل الرابـــــــــــع

عملية التزجيج



أهداف الفصل الرابـــــــع :

من المتوقع أن يتعرف الطالب على :

1- عملية التزجيج في صناعة الخزف.

2- معرفة المواد المستخدمة في عمليات التزجيج وكيفية استخدامها وطرق التزجيج المختلفة.

محتويات الفصل الرابع

(1-4) طلاء الخزف (عملية التزجيج).

(2-4) المواد المستخدمة في الطلاء.

(3-4) مجموعة الاكاسيد القاعدية.

(4-4) مجموعة الاكاسيد الحامضية.

(5-4) عملية الكلسنة.

(6-4) المواد المسببة للعمة (اللاشفافية).

(7-4) طرق التزجيج.

(8-4) التغطيس.

(9-4) الرش.

(10-4) التزجيج بالفرشاة.

(11-4) المعاملات الحرارية.

(12-4) التجفيف وحرق المنتوج النهائي.

(13-4) العوامل المؤثرة فى نجاح التزجيج.

الفصل الرابـــــــــــع

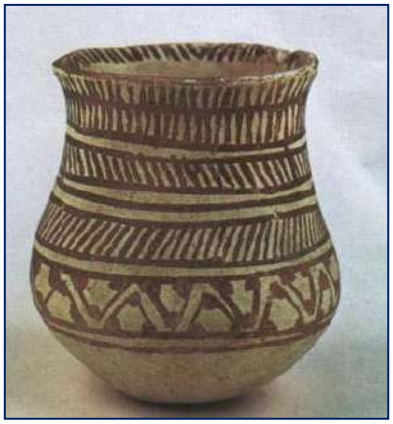
اكتشاف التزجيج لا يمكن ان يحدد بموقع وتأريخ دقيق لان البحث الآثاري والمكتشفات تكشف العديد من الإعمال الاثارية ، ولكن حضارتي وادي النيل ووادي الرافدين شكل (4-1) وبعض المواقع في الهند قد عرفته قبل ما يزيد عن ستة ألاف سنة قبل الميلاد.

ففي اريدو جنوب العراق وجدت قطع مزججة ذات لون ازرق تعود الى (2200 ق.م) ووجدت تحت عتبات بناء شيده الملك اورنمو خرزات بهيئة أجسام كوارتز مطلية بقشرة مزججة باللون الاخضر.

أما المسلمون فقد ابتكروا التزجيج، وما زالت الروائع من أعمالهم في التزجيج باقية في واجهات المساجد والجوامع ، وكذلك في الأبنية الأثرية إضافة إلى ما هو محفوظ في المتاحف العالمية.

ولقد استخدمت الأصباغ المعدنية في هذه الصناعة الفنية، فلم تتأثر بالتقلبات الجوية، ولم تؤثر فيها حرارة الشمس المحرقة طوال مئات السنين الماضية.

وعرف علماء المسلمين البلور وهو الزجاج الممتاز (الكريستال بحسب التعريف الكيماوي الحديث) الذي يحتوي على نسب مختلفة من أكاسيد الرصاص ، وصنعوه بإتقان . حيث استعمله المسلمون من قبل - في صناعة الأقداح والأواني والثريات، وكذلك في صناعة الخواتم وأدوات الزينة وكثير من الأدوات المنزلية. وصنعوا منه نظارات العيون، وكانوا يسمونها منظرة ،ومن العالم الإسلامي انتقلت صناعة الزجاج إلى أوروبا في عصر النهضة الغربية . وانتقلت إليها صناعة الزجاج وأصبحت أهم مراكزها في العالم.



الشكل (4-1) يوضح وعاء من الفخار المزخرف بألوان ترابية (سامراء- 5500ق.م)

(4-1) طلاء الخزف (عملية التزجيج) :

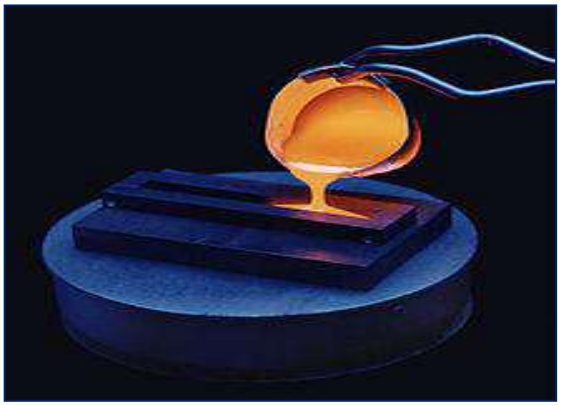
التزجيج هو غطاء رقيق صلب يغلف السطوح الفخارية ويتآصر مع بعض من عناصر مركباتها ، يتكون من الانصهار الحراري لمركبات السليكات ويتداخل جزئياً مع مسامات الفخار فتلغى نفاذيتها وتمنح خاصية حفظ السوائل أو الغازات ، إضافة إلى زيادة مقاومتها للاجهادات الميكانيكية أو الإذابة بالحوامض أو القواعد ، يستثنى من ذلك تأثير حامض الهيدروفلوريك ، اما ظاهرياً فأن التزجيج يضفي جمالية فنية للأجسام المطبق عليها.

ويقصد بالتزجيج ايضاً عملية طلاء الفخار بمواد زجاجية أو اكاسيد كيماوية ترش مع الماء على سطح المادة الفخارية وتتم في درجات حرارة عالية تصل إلى (1200 ^{o}C) حيث يتحول السطح الفخاري إلى سطح زجاجي .

يصنف التزجيج علميا بأنه تركيب يقع بين الحالة الصلبة والسائلة بحيث يمكن اعتباره حالة رابعة للمادة أو خليطاً معقداً من الحالة السائلة لكونه عشوائي التوزيع الذري وللحالة الصلبة لكون تركيبه صلباً ميكانيكيا.

أما كيميائيا فيقصد به هو عملية تحويل المادة (الفخار) إلى مادة صلبة غير متبلورة خالية من أي بنية بلورية عن طريق التخلص السريع من الحرارة أو إضافة المزيد من الحرارة أو خلطها مع إضافات بحيث تتكون طبقة منتظمة ذات بلورات زجاجية تغطي سطح الجسم السيراميكي كما في الشكل (4-2) تكون عادة بهيئة معلق لمكونات التزجيج في الماء ثم يغطى هذا المعلق في الماء ويجفف فتتكون طبقة رقيقة بعد الحرق والانصهار.

تضاف مركبات التزجيج الطبيعية او المصنعة منها الى خليط التزجيج بهيئة اكاسيد او كاربونات او املاح لتصير بعد التفاعل الحراري التأكسدي الى الحالة الاوكسيدية ، ويعتبر ثنائي اوكسيد السليكون (السليكا SO_2) الاساس المكون لكل انواع التزجيج ويضاف له اكاسيد قاعدية كالقلويات والترابية والرصاص وغيرها حيث تعمل على خفض درجة انصهار السليكا ، إضافة إلى تعديل بعض الخواص الفيزيائية وتتحدد خواصه على وفق نوع الاكاسيد المضافة ونسبتها . كما في الشكل (4-3)



الشكل رقم (4-2) يوضح عملية التزجيج

اصناف التزجيج :

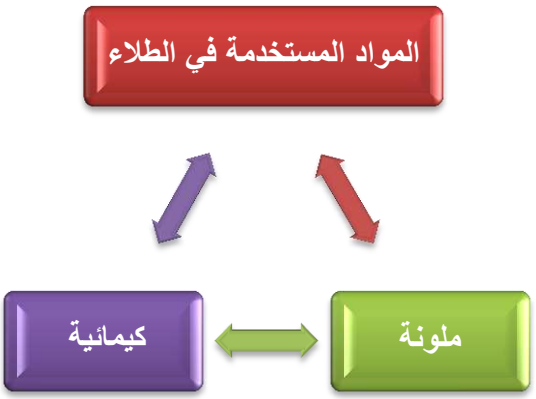
1- يصنف التزجيج طبقاً للمادة ذات التأثير والنسب الوزنية في تركيبة مثل تزجيج الرصاص عند احتواءه على نسب وزنية جيدة من الرصاص.

2- يصنف التزجيج طبقاً لنوع الاجسام الفخارية والتي يتلائم حرارياً معها مثل تزجيج المايوليكا.

3- يصنف التزجيج اعتماداً على التأثير الفيزيائي للناتج بعد الانضاج مثل التزجيج الشفاف او المعتم.

4- يصنف التزجيج وفق درجة حرارة نضجه مثل تزجيج الاجسام الفخارية الحمراء ينضج بين (1150°C - 1000°C) وتزجيج الاجسام الترابية ينضج بين (1050°C - 900°C) وتزجيج الاجسام النارية تنضج بين (1250°C -1200°C)

(2-4) المواد المستخدمة في الطلاء:



شكل (4-3)

تقسم المواد المستخدمة في الطلاء الى قسمين :

أ- كيميائية.

ب- ملونة.

كيميائيا تقسم المواد المستخدمة في الطلاء الى :

1- طلاءات رصاصية:

ويقصد بها ان تكون القواعد رصاصية مثل اوكسيد الرصاص الاحمر او اوكسيد الرصاص الاصفر او كربونات الرصاص.

2- طلاءات قلوية[1]:

ويقصد بها ان تكون القواعد قلوية مثل كربونات الصوديوم او كربونات البوتاسيوم.

3- طلاءات فلسبارية[2]:

اى ان تكون القواعد فلسبارية فى درجات حرارة عالية .

4- طلاءات بوراكسية:

وهي ان تكون القواعد بوراكس .

5- طلاء زجاجى ملحى :

أي ان تكون القواعد ملح الطعام حيث يلقى الملح أثناء نهاية التسوية فى الوقت المناسب فيترسب الصوديوم الصاعد مع الابخرة ويثبت على الاجسام باتحاده مع السليكا فيها ، ولابد للأجسام من خلطة خاصة لا تحتوى على طينات جيرية .

القلويات[1]: هي مواد ذات قوة انصهار قليلة زيادة كميتها تسبب العتمة بسبب اعادة التبلوركما في اوكسيد الكالسيوم .

الفلسبار[2] : مركب من البوتاس أو الصودا مع الإلومينا والسليكا .

اما الطلاءات الملونة فهي :

1- نسب من اكاسيد المعادن التي تقاوم درجات الحرارة العالية مثل الكوبالت الازرق والكروم الأخضر والحديد البني وغيرها.

2- نسب من أملاح بعض المعادن مثل الكربونات والكبريتات مثل كربونات النحاس.

3- الملونات التي تحضر بشكل تجاري من اكاسيد المعادن ومواد أخرى في درجات حرارة معينة والتي تجعل عدد الألوان أكثر.

وان أهمية الطلاء الزجاجى بالنسبة للقطعة الخزفية تتبين فى النقاط الآتية:

1) حماية القطعة الخزفية من التلوث ومن تأثير بعض الاحماض والقلويات.

2) يعطي القطعة الخزفية ناحية جمالية من حيث التنوع فى اللون والملمس.

3) يظفي على القطعة الخزفية سطحا ناعما بدون مسام يسهل معه التنظيف.

4) يزيد من درجة انصهار القطعة الخزفية فيرفع من مقاومتها الميكانيكية.

5) يكون طبقة واقية بزخارف تحت الطلاء.

6) يقوم بسد مسام القطعة الخزفية.

(3-4) مجموعة الاكاسيد القاعدية (Basic Oxides):

وتسمى أيضا (المركبات المعدلة لشبك الزجاج Glaze Network Modifiers)وهي اكاسيد تضاف إلى الاكاسيد الحامضية لتعديل خواص التزجيج من (انصهار، معامل تمدد، مقاومة ميكانيكية وفيزيائية) وان وجود اكثر من اوكسيد قاعدي في تركيب التزجيج يؤدي الى زيادة في الانصهارية افضل من وجود اوكسيد قاعدي واحد .

هذه المواد تضاف لتعديل مواصفات الزجاج وهي واسعة الانتشار في الطبيعة وتكون أما ذائبة في الماء او متحدة مع السليكا مكونه فلدسبار كما في الشكل (4-4) وتسمى (بالمنصهرات) لأنها تعمل على خفض درجة حرارة الزجاج بحيث تزيد من صلابته ومقاومته للظروف الجوية .



الشكل رقم (4-4)

وتقسم الاكاسيد القاعدية إلى :

a- القلويات (Alkali) واهم اكاسيده الفلسبار

1- اوكسيد الصوديوم Na_2O

2- اوكسيد البوتاسيوم K_2O

3- اوكسيد الليثيوم Li_2O

b- القلويات الترابية (Alkaline Earth) واهم اكاسيدها :

1- اوكسيد الكالسيوم CaO

2- اوكسيد المغنيسيوم MgO

3- اوكسيد الباريوم BaO

c- مركبات قاعدية اخرى مثل :

1- الرصاص PbO (Lead Oxide)

2- الزنك ZnO (Zinc Oxide)

(4-4) مجموعة الاكاسيد الحامضية (Acidic Oxide):

وتسمى أيضا (الاكاسيد المكونة لشبك الزجاج Glaze Network Formers), هي المواد الداخلة في تركيب الزجاج التي تمتاز بجهد ايوني أكثر من 7 ، حيث يعتبر السليكا (SiO_2) من أهم الاكاسيد الحامضية والأوسع انتشارا في القشرة الأرضية حيث تشغل (60%) من مكونات القشرة الأرضية ، تتواجد في الطبيعة بهيئة بلورات نقية كالكوارتز كما في الشكل (4-5) أو مع شوائب كالصخور الرملية .

تعتبر السليكا من المركبات الحرارية التي تنصهر بحدود ($1710\ ^{o}C$) ، تتحول عندها الى منصهر زجاجي لزج وشفاف ، حيث تضاف الى خليط التزجيج بأي حالة تركيبية كانت ، ويعتبر الكوارتز انقى حالة بلورية للسليكا الطبيعية .

يمنح السليكا الخواص التالية لتركيب التزجيج :

1- ترفع درجة حرارة نضج التزجيج وهي من الاكاسيد المقاومة حرارياً.

2-تزيد من لزوجة منصهر التزجيج وتقلل السيولة.

3- تزيد من مقاومة المنتوج النهائي ضد الحوامض وفيزيائياً تجاه الاجهادات الميكانيكية.

4- تقلل من معامل التمدد الحراري للسطح الزجاجي .

ومن الاكاسيد الحامضية الاخرى:

1- اوكسيد البوريك B_2O_3

2- اوكسيد الجرمانيوم GeO_2

3- خامس اوكسيد الفسفور P_2O_5



الشكل (5-4) حجر الكوارتز

هل تعلم :

هنالك نوع ثالث من الاكاسيد وتسمى بالأكاسيد المتعادلة لكونها تتصف بخواص حامضية وقاعدية معاً وتعمل على توازن التفاعل في تركيب التزجيج مثل اوكسيد الالمنيوم (الالومينا)

(5-4) عملية الكلسنة (Calcinations) :

وهي العملية التي يتم خلالها تثبيت الخصائص الكيميائية والفيزيائية من خلال المعالجة الحرارية لأكسدة المركبات بدرجة حرارة اقل من درجة انصهار المادة وتصاحب هذه العملية عدة تفاعلات وهي:

1- **تتشكل مركبات جديدة من النواتج المفككة عن طريق تفاعلات الحالة الصلبة.**
2- **تفكك وتحول المركبات غير الثابتة إلى اكاسيد مثل الكاربونات والنترات والأملاح العضوية**
3- **تحول المركبات اللابلورية إلى مركبات بلورية.**
4- **حدوث تحولات عكسية منوعة في التغيرات البلورية.**
5- **تغير بنية المسام والقوة الميكانيكية للمحفزات المترسبة.**

لذلك يشترط للحصول على أداء جيد لهذه العملية إستخدام تقنية التحليل الحراري وحيود الأشعة السينية .

(6-4) المواد المسببة للعمى (اللاشفافية) :

هي المواد التي لا تسمح بمرور الإضاءة الساقطة على التزجيج من خلالها فتسبب العمة ويكون الزجاج معتماً وليس شفافاً ويسمى حينذاك بالزجاج المطفأ وهذه المواد هي :

1- المواد القاعدية:

من المواد القاعدية الشائعة الاستعمال والتي تسبب العمى (اللاشفافية) هو اوكسيد الكالسيوم حيث يسبب ما يسمى (انطفاء الكالسيوم) بالإضافة الى اوكسيد القصدير (SnO_2) حيث يسبب ما يعرف (انطفاء القصدير) واوكسيد التيتانيوم (TiO_2) واوكسيد الزركونيوم (ZnO_2) والالومينا (Al_2O_3).

2- المواد الحامضية:

أهم المواد الحامضية التي تسبب العمى (اللاشفافية) هو السليكا (SiO_2) وان زيادة كميته يسبب عدم نضج الزجاج كما في الشكل (4-6). وهنا نشير إلى أن العمى (اللاشفافية) ليس فقط سببه وجود هذه المواد ولكن قد يكون جزء من تركيب الزجاج هو عامل مسبب للعمى (اللاشفافية) مثل اختلاف التدرج الحجمي للبلورات المكونة لتركيب الزجاج .



شكل (4-6) السيلكا

(7-4) طرق التزجيج :

يعد التزجيج من الوسائل القديمة وان كان في الأصل لإضفاء وظيفة عملية إلى الإناء حيث يجمع التزجيج بين هدفين : العملي والجمالي وان جاء التزجيج بألوان منفذة على الإناء فيميل إلى إن يكون
عنصرا جماليا الى جانب ما يؤديه من الناحية العملية.

فبعد تحضير سائل التزجيج بهيئة عالق مائي متجانس يكون جاهزاً للتطبيق على القطع الفخارية ، ولضمان نجاح التطبيق تتم وملاحظة مدى نظافة السطح الفخاري بحيث يخلو من الاتربة والغبار مع تجنب الاكثار من مسك الجسم الفخاري باليد او تعرضه لمواد زيتية لأنها تسبب حصول اخطاء عند التسوية الحرارية من خلال اضعاف التصاق الطلاء الزجاجي وعزله عن الجسم الفخاري .

أن تقنيات تطبيق التزجيج متعددة وتتحدد بعوامل تتعلق بحجم وشكل القطعة الفخارية ومعدل حجم الانتاج المطلوب إضافة إلى هيئة الإخراج النهائية لسطح التزجيج بعد التسوية الحرارية وفيما يلي الطرق المختلفة للتزجيج :

(8-4) التغطيس (Dip glazing):

وهي أسرع وابسط طريقة معتمدة لتزجج الإعمال الفخارية ذات الإحجام الصغيرة حيث تتطلب أعداد كميه كبيرة من محلول زجاج الخزف في أناء عميق ذي فوهة واسعة وتمسك القطعة الفخارية أما بأصابع اليد أو بواسطة كلاب معدني ذي ثلاثة رؤوس مدببة ثم ينظف الجسم ويرطب بقطعة من الإسفنج ويغطس الجسم في الإناء الذي يحوي على مادة التزجيج ثم يسحب بسرعة، وللتخلص من مادة التزجيج الزائدة يتم بوساطة الاهتزاز، ثم يوضع الجسم فوق حامل ليجف وتزال أثار الأصابع بواسطة فرشاة تترك أثار بسيطة يمكن علاجها بعد أن يجف الجسم وتنظف قاعدته .
ويجب مراعاة تجنب تشكيل فقاعات هوائية سطحية وذلك من خلال حركة دائرية متواصلة للقطعة الفخارية لتجنب تجمع أو تكتل الزجاج عند بعض أجزاء العمل والمنحنيات.

(9-4) الرش (Sprayed glazes):

هي التقنية المثلى في تزجيج وتلوين القطع الكبيرة الحجم مما يتطلب عدداً غالية الثمن وتبذر كميات كبيرة من الزجاج وهي معتمدة بشكل واسع في مشاغل ومصانع إنتاج الخزف الصناعي والخدمي والفني .

أساس هذه التقنية هي ضغط الهواء لتحويل محلول الزجاج إلى رذاذ ناعم يتدفق بتواصل ويوجه إلى سطح القطعة الفخارية ملتصقا بها ليشكل طبقة من الزجاج متجانسة السمك على كل أجزاء العمل الفني .

تمتاز هذه الطريقة بالتحكم بسمك طبقة التزجيج وظهور التأثيرات اللونية المختلفة حيث يستخدمها الخزاف المبتدئ بسهولة بحيث نحصل على ألوان متدرجة ومتداخلة حيث يمكن استخدام مادة تزجيج لزجة لتغطية مادة أخرى اقل لزوجة وسهلة الانسياب فتظهر بقع من المادة السفلى .

وللحصول على طبقة تزجيج منتظمة يجب أن تتم عملية الرش ببطء والطبقة المتكونة ذات سطح يشبه الزغب وتستخدم هذه الطريقة عند تزجيج الجسم للمرة الثانية أما عيوبها فأنها تحتاج كمية كبيرة من مادة التزجيج ويجب ان تكون مادة هشة .

ولان مادة التزجيج سامة يجب أن يكون المكان المخصص للرش مجهزاً بتهوية كافية أما الرشاش فيعرف بالضاغط الهوائي يخرج منه أنبوب مطاطي ينتهي عند مقبض يدوي بهيئة مسدس له فتحة أمامية قابلة للتوجيه والسيطرة على كثافة الرذاذ المتدفق .

(10-4) التزجيج بالفرشاة (Brushed Glazes):

تستخدم هذه الطريقة ذات البعد التأريخي في الرسم على سطح الآنية الفخارية في عصور ما قبل التأريخ عندما كانت تصنع الفرشاة من شعر الماعز أو ريش الطيور.

فعند عمل زخرفة بمادة التزجيج نحصل على نتائج مرضية باستعمال الفرشاة والتي تكون أما من شعر الحيوانات أو الخيوط الصناعية بدرجات نعومة أو خشونة وقياسات وأشكال مختلفة ، ويتم ذلك بتغطية قطع صغيرة الحجم بمادة التزجيج ولكن من الصعب الحصول على طبقة منتظمة من التزجيج باستخدام الفرشاة على الجسم وزجاج مستوي بمستوى واحد باستخدام هذه الأداة.

وتستخدم هذه الطريقة في عمل التجارب للقطع الصغيرة ولا تستهلك كمية كبيرة من مادة التزجيج حيث تتطلب هذه العملية سرعةً ومهارة فائقة ومتداخلة خصوصا عندما يكون الزجاج من عدة طبقات للحصول على السمك المطلوب.

وإذا كانت هناك ثمة تصاميم شكلية معينة يهدف الخزاف لتنفيذها على السطح الخزفي يستدعي استخدام فرشاة التلوين المناسبة للسيطرة على المساحات المناسبة تستخدم هذه الطريقة .

الفرشاة الصغيرة تستخدم لطلاء المناطق المحفورة أو الأجزاء المخططة والفرشاة العريضة لطلاء سطح الجسم ويفضل تكرار عملية الطلاء للحصول على الشكل المطلوب.

هل تعلم :

طريقة اخرى للطلاء بالتزجيج تسمى الطباعة الحريرية لتنفيذ زخرفة او اضافة تأثيرات لونية فوق طبقة التزجيج وتستعمل هذة الطريقة لطلاء او زخرفة بلاطات الارضيات والجدران .

على الرغم من طرق التزجيج المختلفة قد تظهر عيوب على السطح الخزفي المراد تزجيجه ليس من السهل السيطرة على العيوب المختلفة ومن هذه العيوب:

1- التقشر:-

يعتبر التقشر من العيوب الخطيرة حيث يحدث التقشر عندما تكون عملية التزجيج تحت ضغط كبير بحيث تنفصل عن الجسم قشور ويمكن إصلاحها بسهولة بزيادة الاكاسيد ذات التمدد العالي في التزجيج.

2- التشقق:-

هو من العيوب الشائعة في التزجيج ، ويحدث عند ظهور شبكة ناعمة من التشققات في التزجيج بحيث يكون غير صحي لكونه يسمح بنفاذ السوائل إلى الخارج في أثناء الاستعمال .

ويمكن معالجة التشقق باختيار اكاسيد الزجاج ذات معامل تمدد حراري اقل.

3- التجمع:-

يحدث التجمع خلال الانصهار عندما ينفصل سائل التزجيج ويترك بقعاً مكشوفة في الجسم الفخاري تتراكم على شكل قطرات صغيرة تتجمع أسفل القطعة.

وان أسباب هذا العيب هو طلاء القطع الفخارية غير النظيفة (وجود مواد دهنية نتيجة ملامسته باليد) لذا يجب ان تخزن القطع المفخورة في مكان بعيد عن الغبار وإذا تعرضت للغبار فيجب غسلها بالماء قبل تزجيجها.

وهناك سبب اخر هو الانكماش في أثناء التزجيج إذ تتكون فقاعات فبعض مواد التزجيج كالطين لها انكماش عال لذا يجب معالجة الفقاعات التي تظهر بالتزجيج بأزاله الفقاعة ويملأ مكانها بزجاج جاف تقريبا ، ويمكن إضافة الصمغ لسائل الزجاج ليجعل الطلاء اكثر تماسكا على سطح الجسم الفخاري .

4- البثور:-

يحدث هذا النوع من أنواع العيوب لسائل التزجيج الحاوي على مركبات الرصاص اكثر من سائل التزجيج الحاوي على الرصاص وحده مما يسبب ظهور البثور وتكون هذه البثور داخل تجاويف الجسم الفخاري ويمكن معالجتها باستخدام طلاء خفيف على سطح القطعة الخزفية حيث أن القطع الزجاجية المزججة بعناية لا تكون عرضة لمثل هذا النوع من العيوب.

(4-11) المعاملات الحرارية :

تعتبر المعاملات الحرارية من أهم مراحل الخزاف لان انجازها يعني عملاً خزفياً كاملاً، وهذه العملية هي الأوسع اعتماداً فبعد مرحلة التزجيج يحرق الجسم لإنضاجه وتداخله مع مكونات التزجيج حيث تبدأ عملية تبخر الماء بدرجة حرارة تزيد عن (100 °C) .

وعند درجة (573°C - 226°C) وهي الحدود الحرارية لتحول الوجوه البلورية للسليكا في تركيب الجسم الفخاري، حيث تبدأ بعض الاكاسيد القاعدية بالانصهار بدرجة حرارة منخفضة وتتطاير كالصوديوم والرصاص وبعض الاكاسيد لا تظهر فعاليتها إلا في درجات حرارة مرتفعة مثل الكالسيوم والمغنيسيوم وبعض الاكاسيد لا تظهر فعاليتها إلا بوجود صواهر أخرى تتداخل معها.

وفي درجة (600 ^{o}C) تبدأ الاكاسيد القلوية بالانصهار كالصوديوم والبوتاسيوم ويتحول الطلاء الزجاجي الى قشرة صلبة ، حيث تستمر عملية التفاعل التدريجي لكل المركبات لحين ظهور التزجيج الناضج على السطح الفخاري ، وعند تصاعد الحرارة إلى درجة الاحمرار تبدأ معها بعض تراكيب التزجيج الضعيفة والمفككة كالكربونات بالتبخر والتطاير وبدء التفكك للكربونات إلى اكاسيد مثل ثنائي اوكسيد الكاربون (CO_2) حيث ينصح في هذه المرحلة بإطالة زمن رفع الحرارة كي تتجمع الفقاعات الغازية معاً ويكبر حجمها فتتصاعد على السطح الفخاري وتتطاير كما في الجدول ادناه .

التوهج	درجة الحرارة المئوية	التوهج	درجة الحرارة المئوية
	0	احمر معتم	700
	50	احمر عميق	900
	100	احمر ساطع	1050
	200	برتقالي	1100
أعلى تسخين للفرن العادي	300	برتقالي ساطع	1200
	400	اصفر	1250
	500	ابيض	1300
مسود	550	ابيض مزرق	1400
أول احمرار مرئي	600		

ان اغلب تراكيب التزجيج متدني الحرارة يصل حد الميوعة بحدود 1000درجة مئوية وهي الدرجة ذاتها التي يتم فيها التآصر بين تراكيب التزجيج والجسم الفخاري بصورة مرتفعة، ولان تراكيب التزجيج تتصف بدرجة بالنضج دقيقة وتتأثر بأي زيادة أو نقصان في الحرارة ما عدا المركبات الحاوية على الرصاص فأنها تتصف بنضج لمدى واسع من الحرارة .

اغلب المعاملات الحرارية تتم في جو تأكسدي عند حرقه للتزجيج مثل الخزف الترابي الحاوي على الرصاص في حين بعض تراكيب التزجيج تحرق في جو اختزالي مثل البورسلين.

(12-4) التجفيف وحرق المنتوج النهائي :

تهدف عملية تجفيف الفخار إلى عدم حدوث التواء يصاحبه انكماش في تشكيل العجينة وذلك لكون جزيئات الماء سريعة الخروج على سطح الجسم الفخاري ، حيث أن الطين الرطب يحتوي على كمية كبيرة من المياه تصل إلى (25%) كحد أدنى. أن الطينة ذات إحجام الجسيمات الدقيقة تتقلص بشكل اكبر من إحجام الجسيمات الكبيرة مما يكسبها قوة وهي في الحالة الجافة كما في الشكل (4-7).

مرحلة الحرق تتم في أفران مصنوعة من الطوب الحراري وتعد مرحلة الحرق أهم اختبار للجسم الفخاري لتبين :

أ- مدى تحملها للنار.

ب- درجة تماسك جزيئاته وتفاعلها مع بعضها لتتحول من جسم ضعيف هش الى جسم صلب متماسك يتحمل الضغط والشد والاحتكاك.



الشكل (4-7) صور للفخار المجفف

وقد يجفف الفخار بوضعة في عربات تخزن في انفاق تحمى بالوقود بحيث لايصيبها أي تغير في شكلها مع مراعاة عدم الإسراع في التجفيف وذلك بوضع الجسم في أفران رطبة وارتفاع بطئ في درجة حرارة الغرفة وان أي تغير مفاجئ في الحرارة يسبب الانشقاق والتكسير.

يجب أن تكون حرارة الأفران كما في الشكل رقم (4-8) المبطنة بالطوب فوق (800°C) وأحيانا تحتاج (1500°C) وان لكل نتاج خزفي درجة حرارة معينة حيث يبدأ الماء بالخروج من الخزف كلما ترتفع درجة الحرارة ، وعند الوصول إلى درجة غليان الماء (100°C) قد يؤدي إلى الانفجار لذلك يجب التحكم في حرارة الفرن باستخدام مروحة لتحريك بعض الهواء في منطقة

التجفيف وعند الوصول لدرجة (350°C) يحدث تغير في جزيئات الصلصال ويكون مزيجاً من الطين المجفف مع الماء ليكون الطين الرطب الجديد.

ففي درجة حرارة (573°C) يتحول الكوارتز إلى الفا أو بيتا كوارتز وتتكون أطوار زجاجية مختلفة تعتمد على التركيب المعدني والكيميائي وحجم الحبيبات ومده الحرق للجسم الخزفي . وعند الوصول لدرجة (900°C) يتم حرق المـــواد العضوية مثل الكاربون والكبريتات ويجب وجود مـــا يكفي من الأوكسجين وإذا لم تكتمل مرحلة الأكسدة فأنها تسبب الانتفاخ في الجسم الفخاري .



الشكل (4-8) فرن حرق الفخار بعد جفافه

وبعد الحرق يسحب الهواء من داخل الفرن عبر مدخنة علوية وفتحات جانبية ويسمح للهواء العادي بالدخول إلى الفرن والتأكد من برودة القطع الفخارية باللمس وقد تبدو القطع جافة لكنها لا تزال رطبة وهذا يتطلب استمرار عملية التبخر.

أن إتمام عملية نضج التزجيج لا يعني اكتمال دورة الحرق بل يشمل عملية التبريد فبعد فصل المصدر الحراري عن الفرن تبدأ الحرارة بالانخفاض تدريجياً إلى درجة حرارة الغرفة ويحصل خلالها الانكماش بين الجسم والتزجيج بالإضافة إلى أن التبريد المتسارع يسبب تكسراً في الجسم الفخاري .

أما التبريد البطئ فيسبب تحويل التزجيج اللامع إلى معتم بسبب منح الوقت الكافي لمنصهر التزجيج لنمو بلورات والذي تؤثر على الملمس السطحي والانعكاس الضوئي لذا يتوجب على الخزاف الإلمام بتلك المتغيرات.

هنالك الكثير من العيوب التي تتكون أثناء الحرق تسبب تلف الجسم الفخاري المراد تزجيجة ومن أهمها:

1- الشروخ (Cracks):

تنتج الشروخ من الضغوط الميكانيكية التي تحدث بسبب التمدد والانكماش للجسم الفخاري عندها تتكون ضغوط أكبر مما يتحمله الجسم الفخاري.

أما أسباب الشروخ متعددة ومنها:

a- تحدث الشروخ نتيجة الضغط الناشئ عن تبخر الماء أو احتراق المواد العضوية مما يؤدي إلى حدوث تغيرات فيزيائية اثناء الحرق حيث يعتبر ضغط بخار الماء اخطر من البخار الناتج من احتراق المواد العضوية مثل الكاربونات أو الكبريتات ذات التمدد الحراري الكبير.

b- إذا كانت درجة حرارة الحرق عالية فإن الوقت لا يكفي للسماح لهذه الغازات المحصورة بالخروج من خلال مسام الجسم أو القنوات الشعرية حتى تصل إلي القيمة الحرجة (Critical Value) التي لا تسبب تشرخ الجسم حسب بل قد تؤدي إلي انفجاره .

c- وقد يرجع التشرخ إلى نقص وفقدان المادة العضوية التي توجد بكميات مختلفة ويسبب فقدانها زيادة انكماش الجسم وبالتالي تشرخه.

d- و التشرخ قد ينشأ نتيجة التغيرات التي تحدث للسليكا مثل تحول الكوارتز من إلفا إلي بيتا وهو تحول عكسي .

حيث توجد أطوار متعددة للسليكا مثل إلفا وبيتا ويصاحب ذلك تغيرات في ترتيب البلورات، وهذه التغيرات في الحجم تسبب ضغوطاً في الجسم قد تؤدي إلي تشرخ هو معظم هذه التغيرات تحدث فجأة ، مما يؤدي إلي حدوث صدمات حرارية (Sudden Thermal Shocks) ينجم عنها العديد من الشروخ الدقيقة والشعرية، وقد لا تلاحظها العين ، ولكنها تظهر تحت الميكروسكوب ، وتظهر بشكل واضح في الأواني المشكلة باليد .

e- هناك بعض الشروخ التي توجد في حافة الجسم الفخاري وتتميز باتساعها عند الحافة وضيقها في ألاسفل ويرجع هذا النوع من الشروخ إلى عيب في التصميم ،حيث تكون الحافة رقيقة جدا بحيث لا تتحمل ، كذلك فإن طريقة الصناعة قد تكون غير سليمة فقد يكون الجفاف سريع وغير متساوٍ.

2- الالتواء(Warping):

الالتواء يحدث في أثناء الجفاف ويكون نتيجة الانكماش غير المتساوي وذلك بسبب اختلاف محتوى الماء حيث تساعد تيارات الهواء على حدوث الالتواء ،بالإضافة إلى ذلك فإن التجفيف والحرق السريع يؤديان إلى حدوث الالتواء .

يؤدي الانكماش المختلف إلى حدوث الالتواء وذلك لعدة أسباب منها اختلاف معدل فقدان الماء من السطح والجزء الداخلي كذلك التوزيع غير المتساوي للماء داخل الجزئيات وبالتالي الانكماش الكلى لكونه غير متساوي أيضا فإنه يتأثر بترتيب الجزئيات في أثناء التشكيل .

ومن أهم أسباب الالتواء مايأتي :

1- قد يرجع سبب الالتواء إلي عملية التجفيف والتي تسبب الانكماش نتيجة التجفيف غير المتجانس، ويظهر بوضوح في القطع الطينية المشكلة ببناء الألواح الطينية، حيث يحوي السطح الخارجي محتوىً مائي أقل من الداخلي، ولذلك يجف السطح الخارجي بسرعة كبيرة مما يسبب تقوس والتواء السطح نحو الداخل ويزداد الالتواء بالحرق .

2- غالبا ما يصاحب الالتواء تشقق، وذلك عندما يكون التوتر الناشئ عن الجفاف أكثر مما يستطيع الجسم تحمله ، ويزداد بالحرق ، وقد يرجع الالتواء والتقوس إلي طريقة الرص غير الصحيحة لعدم تعادل الضغوط ، وقد يرجع التقوس أيضا إلي عدم تماثل الجدران في الإناء الواحد حيث يعتمد على تقنية التشكيل وطبيعة الجسم وما يحتويه من شوائب.

3- قد يرجع الالتواء إلي اختلاف درجة حرارة الفرن أثناء الحريق، وقد يؤدي ذلك إلي حدوث انكماش مختلف ينجم عنه التواء الجسم .

4- قد يعزى التقوس إلى الضغط الذي يقع على القطع المرنة والجافة تقريبا عند تناولها باليد، وقد يكون هذا الضغط غير كبير وبدرجة لا يمكن ملاحظتها ، ولكنه قد يكون سبباً في تقوس الجسم والتوائه في مراحل الحرق.

3- التفلق أو التصدع :

ينشأ هذا النوع من العيوب في أثناء عملية التجفيف الخاطئ، وهي ظاهرة ناجمة عن نشأة العديد من الشروخ الشعرية والدقيقة عند حواف الجسم ،التي جفت بسرعة بدرجة أكبر عن باقي أجـزاء الجسم وتتشابه أسباب التفلق مع أسباب الالتواء . حيث تعمل المسام والإضافات على وقف انتشار هذه الشروخ .

وينتج هذا العيب ايضا من الضغوط الناشئة عن الحرق والتبريد ، وتعد تحولات السليكا عند ((573°C)(°C226 هي السبب الرئيسي فى هذا النوع من الشروخ ومن أنواع هذا التصدع :

1- تصدع البسكويت (Biscuit dents) :

وهذا النوع يحدث ربما نتيجة التبريد وذلك بسبب تحولات الكوارتز مما يؤدى إلى انخفاض مفاجئ في الحجم . وهذا النوع من تصدع البسكويت يكون عبارة عن شروخ شعرية دقيقة (Hair Cracks) يمكن رؤيتها بصعوبة.

2- تصدع الحرق (Firing dents) :

والذي يحدث أيضا نتيجة تحولات الكوارتز وهذه التحولات تعطى الجسم الفخاري زيادة مفاجئة في الحجم.

3- تصدع التبريد (Cooling dents) :

وهو أشهر الأنواع ، وهذا النوع تكون حوافه حادة ، وبسبب اكتسابه للحرارة تجعل قاعدة الجسم الفخاري يحتفظ بالحرارة أكثر من الجزء العلوي ، وبالتالي فإن الجزء العلوي ينكمش أكثر من القاعدة و ينتج عن ذلك شرخ دائري .

4- الانفجار :

تحدث ظاهرة انفجار للجسم الفخاري أثناء الحرق نتيجة ارتفاع درجة حرارة الحرق بسرعة كبيرة جدا وفجائياً، حيث يتحول الماء إلي بخار ماء، فضلاً عن تولد العديد من الغازات الناتجة عن تحلل المواد العضوية مثل الكربونات والكبريتات وغيرها.

فإذا لم تتح الفرصة لتلك الأبخرة أو الغازات في الخروج من خلال المسام أو القنوات الشعرية، فإنها ستتراكم حتى تصل إلي قيم حرجة ولا يستطيع الجسم تحملها ، فتحدث ظاهرة انفجار قد تؤدي إلي تلف قطع أخري مجاورة .

5- التبقع :

يحدث هذا النوع من أنواع العيوب اذا كان الوقود المستخدم عبارة عن بقايا حيوان وقش وخشب ، وكان جو الحرق ما بين جو مؤكسد ومختزل، لذلك فان السطح يتبقع ، وهذا يشير إلي تأثير الحرق غير المنتظم أو تأثير الدخان الكثيف للوقود على الجسم الفخاري .

(13-4) العوامل المؤثرة في نجاح التزجيج :

أن نجاح التزجيج للأجسام الفخارية مرتبط بعدة عوامل منها :

1. **الماء :هو عامل مهم في عملية التزجيج فالماء المتوفر لأغراض الاستخدام قد يتفاوت في نوع ونسب المعادن الطبيعية فمنه يحوي على الكاربونات او نسب معينة من الحديد او الالومينا وبعضها القليل من القواعد كالكالسيوم لذلك من الافضل اعتماد المياه المخزونة من الأمطار أما كميته فإذا كانت قليلة تسبب التصاق الحبيبات على سطح الجسم لذلك يجب ان تكون كميته معتدلة في سائل التزجيج.**
2. **قوام مزيج التزجيج :التحكم في سيولة وجريان سائل التزجيج عامل مهم لان بعض مركبات التزجيج سريعة الترسيب في قاع الإناء مما يتطلب إضافة مواد تعيق من ترسيبه مثل المياه الحاوية على املاح حيث تزيد من كثافة المحلول وعدم ترسيبه واحياناً العكس حيث يكون قوامه شديد التماسك فيتطلب اضافة مواد مشتتة مثل مركبات الصوديوم.**

3. **صلابة طبقة التزجيج :ان اضافة نسبة من مواد عضوية (نسب كبيرة من الاطيان) تعمل على زيادة صلابة سائل التزجيج وخاصة بعد جفافه ويكون سطحاً قوياً في حين اذا كان سائل التزجيج محتوياً على كمية قليلة من الاطيان فتكون سطحاً هشاً .**

4. **حجم حبيبات مركبات التزجيج : لها اهمية واضحة في تقنية التطبيق فالحبيبات الكبيرة تسبب حصول فتحات على سطح التزجيج ،اما الحبيبات الصغيرة فتسبب تشققات في سطح التزجيج**

لذلك فأن عملية الطحن والخلط تحدد حجم الحبيبات وان افضل حجم للحبيبات تقع بحجم اصغر من 10 مايكرون.

5. طرق طلاء التزجيج :ان نجاح عملية التزجيج مرتبط بطرق التزجيج المختلفة وتقنية تطبيقها كالطلاء بالرش ،الفرشاة والتغطيس ولكل محلول طريقة طلاء معينة فمحلول التزجيج بطريقة الرش يكون اقل كثافة من محلول التزجيج بطريقة التغطيس.
6. الخبرة : أن أعداد مزيج التزجيج يتطلب معرفة علمية بسيطة مع خبرة مكتسبة ودقة تنفيذية .

اسئلة الفصل الرابع

1: ماذا يقصد بالتزجيج ؟ وما هي المواد المستخدمة في الطلاء لتزجيج القطع الفخارية ؟
2: قارن بين الاكاسيد الحامضية والاكاسيد القاعدية من حيث تأثيرها على التزجيج؟
3: ماذا يقصد بالعمى (اللاشفافية) ؟ وما هي المواد المسببة للعمى (اللاشفافية).
4: ما هي المعاملات الحرارية التي يحدث فيها نضج المنتوج ؟
5: نجاح عملية التجفيف وحرق المنتوج النهائي مرتبط بعدة عوامل ما هي ؟
6: عدد العوامل المؤثرة في نجاح التزجيج ؟

املا الفراغات التالية بما يناسبها .

1- ان اضافة نسبة من المواد العضوية تعمل على ..... سائل التزجج
2- يعتبر التقشر في الزجاج من ..... الخطيرة
3- ان عملية الكلسنة هي العملية التي يتم خلالها تثبيت الخصائص .....و ..... من خلال المعالجة الحرارية .

الفصـــــــــــل الخامس

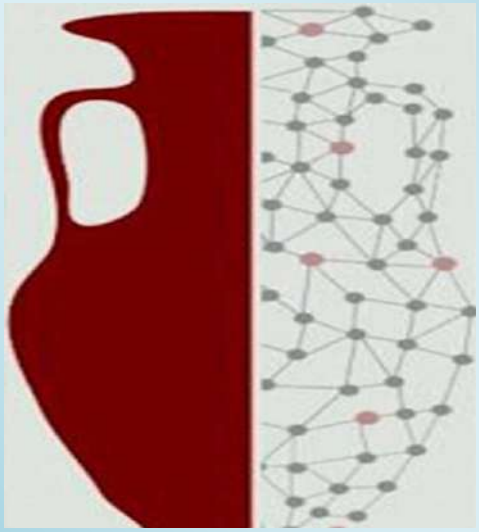
أهداف الفصل الخامس :

من المتوقع أن يتعرف الطالب على :

1- أنواع الاكاسيد الداخلة في التزجيج.

2- حساب النسب المئوية الوزنية لكل نوع من التزجيج .

نظرية سيجر



الفصـــــل الخامس

يعد هيرمان سيجر (Hermann Seger) (1839-1893 ميلادية) أول من أجرى التجارب العملية لضبط وملاحظة تصرف أكاسيد التزجيج على وفق نسب وزنيه جزيئية ، يتم التعرف من خلالها على علاقات رقمية اعتمدت من قبل الخزافين و الصناعيين لغاية اليوم وهي ما سمي بصيغة سيجر (Seger formula) و تعتمد على تصنيف الاكاسيد الطبيعية الى ثلاث مجاميع واعطائها رموزاً كما يأتي:

1- الاكاسيد المكونة للزجاج:

ويكون تركيبها البلوري عشوائياً و تكون حامضية و صيغتها (RO_2) (ذرة عنصر مرتبطة بذرتي اوكسجين) حيث R يمثل احد العناصر التي تحقق الصيغة مثال على ذلك:

$$RO_2 \equiv SiO_2$$

2- الاكاسيد المساعدة على الصهر:

تعمل على تقليل درجة حرارة انصهار خلطة التزجيج و زيادة جريانية المنصهر على سطح الجسم السيراميكي و تعتبر اكاسيد قاعدية صيغتها اما R_2O او RO و تعمل على معادلة الحامضية الناشئة من الاكاسيد المكونة للزجاج و من امثلتها:

$$R_2O \equiv Na_2O \ ، \ RO \equiv CaO$$

3- المثبتات :

عبارة عن اكاسيد وسطية تعمل على تثبيت منصهر التزجيج و عدم تسارعه على سطح الجسم السيراميكي و تعتبر اكاسيد متعادلة تقريباً و لها صيغة R_2O_3 و من امثلتها

$$R_2O_3 \equiv Al_2O_3$$

و لغرض تنظيم حساب جبري لنسب هذه الاكاسيد ثبت سيجر قيمة الاكاسيد القاعدية مساوية الى وحدة جزيئية و احدة (1) و بقية الاكاسيد تحسب على ضوئها ، فالعلاقة الرقيمة الاولى التي تربط بين الاكاسيد القاعدية و الحامضية و التي تتحكم في درجة حرارة نضج التزجيج نظمت على وفق النسب الاتية:

-1

$\frac{\text{اكاسيد قاعدية } \mathbf{R_2O}}{\text{حامضيةاكاسيد } \mathbf{RO_2}}$ **من** $\frac{1}{1}$ **لغاية** $\frac{1}{2}$ **ينتج عنها تزجيج واطئ الحرارة**

-2

$\frac{\text{اكاسيد قاعدية } \mathbf{R_2O}\text{،}\mathbf{RO}}{\text{اكاسيد حامضيه } \mathbf{RO_2}}$ **من** $\frac{1}{2}$ **لغاية** $\frac{1}{3.5}$ **ينتج عنها تزجيج متوسط الحرارة**

-3

$\frac{\text{اكاسيد قاعدية } \mathbf{R_2O}\text{،}\mathbf{RO}}{\text{اكاسيد حامضيه } \mathbf{RO_2}}$ **من** $\frac{1}{4}$ **لغاية** $\frac{1}{6}$ **ينتج عنها تزجيج عالي الحرارة**

من الممكن تحديد درجة نضج النوعين من التزجيج ضمن حدود درجة الحرارة:

Earthen Ware: 900 – 1150 ℃ L.Temp.

Stone Ware: 1150 – 1250 ℃ L.Temp.

اما العلاقة الرقمية الثانية و من خلال التجربة العملية المباشرة فقد اتضح ان نسبة الاكاسيد المتعادلة الى الحامضية تحدد درجة الشفافية و العتمة للتزجيج و كالتالي:

-1

$\frac{\text{اكاسيد متعادلة } \mathbf{R_2O_3}}{\text{حامضيةاكاسيد } \mathbf{RO_2}} = \frac{1}{10}$ **ينتج عنها تزجيج شفاف**

-2

$\frac{\text{اكاسيد قاعدية } \mathbf{R_2O}}{\text{حامضيةاكاسيد } \mathbf{RO_2}} = \frac{1}{7.5}$ **ينتج عنها تزجيج متوسط الشفافية**

-3

$\frac{\text{اكاسيد متعادلة } R_2O_3}{\text{حامضيةاكاسيد } RO_2} = \frac{1}{5}$ **ينتج عنها تزجيج معتم.**

يمكننا توضيح هذه القاعدة بمعنى اخر اي *قواعد صيغة التزجيج* و كما يأتي:-

1) القاعدة الاولى : درجة الحرارة

تعتمد درجة الحرارة حسب الصيغة التي وضعها سيجر على النسبة بين الاكاسيد القاعدية (R_2O،RO) الى الاكاسيد الحامضية (RO_2) فاذا كانت النسبة من وحدة واحدة الى وحدتين تكون درجة الحرارة واطئة و من وحدة واحدة الى ثلاث وحدات و نصف (1-3.5) تكون درجة الحرارة متوسطة ، و من وحدة واحدة الى اربع وحدات (1-4) تكون درجة الحرارة عالية بحدود الاجسام الفخارية اما اذا كانت النسية من وحدة الى ست وحدات (1-6) تتكون درجة الحرارة عالية بحدود تزجيج الاجسام الصخرية.

2) القاعدة الثانية: نوعية التزجيج

تعتمد نوعية التزجيج في تركيب صيغة التزجيج على النسبة بين المادة المتعادلة (R_2O_3) و بين المادة الحامضية (RO_2)، فاذا كانت النسبة من وحدة واحدة (1) من الالومينا (Al_2O_3) المادة المعادلة الى خمس وحدات (5) من السليكا (SiO_2) المادة الحامضية يكون التزجيج الناتج مطفأ اما اذا كانت النسبة من وحدة واحدة (1) من (Al_2O_3) الى سبع و نصف وحدة (7.5) من (SiO_2) فالتزجيج الناتج (شبه مطفأ) او نصف مطفأ اما النسبة من وحدة واحدة (1) من (Al_2O_3) الى عشر وحدات (10) من (SiO_2) فالتزجيج الناتج تزجيج شفاف او لماع.

إذن تركيب التزجيج له قواعد و نظم يجب الأخذ بها لكي نحضر تركيبة التزجيج المحددة، وعليه فان صيغة التزجيج لها جانبان في حساب التركيب النهائي هما الجانب الكيميائي المعتمد ضمن خواص الاكاسيد من المواد الخام ووحداتها الجزيئية و الجانب الحسابي والذي تنتج عنه الأوزان المئوية للمواد الخام الداخلة في تركيب صيغة التزجيج.

إن نسبة القاعدة إلى الحامض و نوعية القاعدة المستعملة و عدد القواعد تعتبر عوامل مسيطرة و مؤثرة على سلوك مركبات التزجيج لذلك فإنها تحدد درجة حرارة نضج الصيغة.

وأحتواء مادة التزجيج على قاعدتين او اكثر من قابلية انصهارها تختلف عن التي تحتوي على قاعدة واحدة بالرغم من تساوي وزنيهما...

تجدر الاشارة هنا الى أن النسب الرقمية سالفة الذكر لم تكن قاطعة النتائج كونها تعتمد على أنواع الأكاسيد و بالذات القاعدية و درجة تأثيرها ألانصهاري و قوتها الكيميائية ، و لهذا تكتسب المعرفة العالية و الدقيقة لتأثير مركبات التزجيج من خلال التجربة و الخبرة المتراكمة.

أعتماداً على الأسس الرقمية التي طرحها العالم الألماني هيرمان سيجر و التي تسمى وحدات الصيغة يمكننا تنظيم جدول لتحويل تلك الوحدات الى أوزان حقيقية للمواد الخام التي تعطينا الأكاسيد المطلوبة لعمل التزجيج، و لغرض الأيضاح التفصيلي ندرج المثال التالي:

سؤال : نظم صيغة جزيئية لتزجيج ينضج بدرجة حرارة واطئة و يكون ذا شفافية و لمعان ؟

1- تنظم صيغة وتسمى مجموعات الأكاسيد المطلوبة لتركيب التزجيج حسب الترتيب في الجدول التالي:

القاعدية R_2O،RO	المتعادلة (Al_2O_3)	الحامضية RO_2
K_2O 0.2	(Al_2O_3)	SiO_2
PbO 0.8	0.2	2
1	0.2	2

2- على وفق قانون سيجر تكون الأكاسيد القاعدية مساوية لوحدة واحدة (1) ، و يكون التزجيج واطئ الحرارة، نفرض ان نسبة الاكاسيد القاعدية الى الحامضية 2:1 اي ان وحدة الاكاسيد الحامضية تكون 2 وحدة صيغة.

3- لكون التزجيج المطلوب شفافاً لماعاً فان نسبة التعادل الى الحامضي يجب ان يكون وفق ما ذكره سيجر10:1 و تحسب الوحدة كالتالي:

$$\frac{R_2O_3}{2} = \text{سيجر } \frac{1}{10} = \frac{R_2O_3}{RO_2}$$

من الصيغة (و حاصل ضرب البسط و المقام في طرفي المعادلة) تصبح

$1 \times 2 = R_2O_3 \times 10$

$R_2O_3 = \frac{2}{10} = 0.2$

وهي قيمة وحدات الاكاسيد المتعادلة اي (Al_2O_3).

4- بعد تنظيم وحدات الصيغة و نوع الأكاسيد ياتي الان البحث عن المواد الأولية التي يمكن استخدامها لتعطينا الأكاسيد اعلاه . اي ينظم جدول بالمواد الأولية المكونة للتزجيج على وفق الجدول الاتي:

الجدول (5-1)

الاكاسيد المطلوبة *Oxides*				المواد الاولية *RAW Materials*	وحدة الصيغة *F.U* او*M.P*	الوزن الجزئي *Mol.wt.*	الوزن *P.by Weight*	الوزن المئوي *Wt%*
K_2O 0.2	*PbO* --	Al_2O_3 0.2	SiO_2 *1.2*	*$K_2O.Al_2O_3.6SiO_2$ Potash Feldspar*	0.2	556.5	111.3	32.95
	0.8			*PbO (Litharg) (Lead Oxide)*	0.8	223	178.4	52.82
			0.8	*SiO_2 (Flint)*	0.8	60	48	14.21
0.2	0.8	0.2	2.0				33.77	99.98

5- لغرض الحصول على أكاسيد البوتاسيوم K_2O الألومينا Al_2O_3 و السليكا SiO_2 معاً من مركب وأحد تم اختيار فلدسبار البوتاسيوم المحتوى على ثلاثة اكاسيد مقدارها وحدة لأوكسيد البوتاسيوم و مثلها للالومينا وستة جزئيات للسليكا ، و يعني ذلك ان الكمية المطلوبة للأوكسيد الأول حسب الصيغة اعلاه (الجدول (5-1)) هي (K_2O 0.2) تؤخذ كأساس و توضع نفس قيمتها في حقل الألومينا (0.2) و ستة امثالها للسليكا (SiO_2 1.2) و كما هو مبين في الصيغة الأتية:

$K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6\ SiO_2$

$2 \quad 1 \times 0.2 \quad 6 \times 0.2$

فيصبح ($6\ SiO_2 = 1.2$) ، ($Al_2O_3 = 0.2$) ، ($K_2O = 0.2$)

بعد ذلك يتم ضرب وحدة الصيغة للبوتاسيوم ×(2.0) الوزن الجزيئي للفلدسبار للحصول على الكمية الوزنية المطلوبة للتزجيج.

6- للحصول على اوكسيد الرصاص تم اخذ اوكسيد الرصاص الاصفر كمصدر له و بالكمية المحددة بالصيغة (0.8) لتضرب بالوزن الجزيئي للرصاص لنحصل على الكمية المطلوبة ، ونكون باستخدام الفلدسبار و الرصاص الاصفر قد حصلنا على الاكاسيد القاعدية والمتعادلة كاملة و (1.2) من كمية الاكاسيد الحمضية (SiO_2) و التي مجموعتها (2).

7- تكون الأكاسيد الحامضية ناقصة (0.8) وحدة كي يكمل وزنها و نحصل عليه من أستخدام مركب الفلنت SiO_2 الطبيعي ، و نقوم بضرب الكمية (0.8) بالوزن الجزيئي له لنحصل على الكمية المطلوبة للتزجيج و هي الكميات المدونة في حقل الوزن.

8- نقوم بوزن الكميات المطلوبة بوحدة وزن واحدة مثل الغرام او الكيلوغرام و تخلط بالماء جيدا لتكوين مستحلب متجانس يطبق على القطع الفخارية و يتحول الى غطاء زجاجي بعد الحرق بدرجة حرارة بحدود درجة نضج الخلطة ، و تتراوح من 850 الى 1050 درجة مئوية.

المصطلحات المستخدمة في الصيغة التركيبية للتزجيج الجدول (5-2)

اسم المصطلح	المختصر للمصطلح
الأجزاء الجزيئية	F.U او M.P
الوزن الجزيئي	M.W
الأجزاء او الأوزان الفعلية	P.by.W
النسبة المئوية	Re.
المواد الاولية	R.M

س1) كوّن وصفة تزجيج قلوية تعطي تزجيجا شفافا بدرجة حرارة عالية ضمن حدود (Earthen Ware)؟

RO_2	R_2O_3	$RoIR_2$
SiO_2 4	Al_2O_3 0.4	Na_2O 0.4
Li_2O 0.4		
CaO 0.2		

الجدول (5-3)

Na_2O	Li_2O	CaO	Al_2O_3	SiO_2	R.M	M.P	M.W	P.by. W	Recipe
0.4	-	-	0.4	2.4	$Na_2O.Al_2O_3.6SiO_2$	0.4*	524.3	209.72	59.02
-	0.4	-	-	-	Li_2CO_3	0.4*	47	29.6	8.33
-	-	0.2	-	-	$CaCO_3$	0.2*	100	20	5.62
-	-	-	-	1.6	SiO_2 (Flint)	1.6*	60	96	27.01
								355.32 T.	99.98 100%

- استخراج قيمة Al_2O_3 في الصيغة

$$\frac{R_2O_3}{RO_2} = \frac{Al_2O_3}{SiO_2}$$

$$\frac{1}{10} = \frac{Al_2O_3}{4}$$

$$Al_2O_3 = \frac{4}{10} = 0.4$$

س2) حضّر صيغة تزجيج تحتوي على ثلاثة اجزاء قاعدية قلوية كي ينضج التزجيج بدرجة حرارة عالية بحدود (Earthen Ware) ويصبح معتماً ؟

درجة حرارة عالية حدود (Eatrthen Ware) : 1 الى 4

زجاج معتم (Matt) 1 الى 5

استخراج قيمة Al_2O_3

$$\frac{R_2O_3}{RO_2} = \frac{1}{5}$$

$$\frac{1}{5} = \frac{Al_2O_3}{4}$$

$Al_2O_3 = 0.8$

و بما ان نوع التزجيج معتم بإمكاننا تقليل نسبة SiO_2 في الصيغة و ذلك بإضافة نسبة من B_2O_3 مع SiO_2 لإعطاء عتمة في التزجيج . كذلك ستكون نسبة Al_2O_3 عالية لأنها هي من يحدد العتمة :

RO/R_2O	R_2O_3	RO_2
Na_2O 0.6	Al_2O_3 0.8	SiO_2 2.8 + B_2O_3 1.2
CaO 0.2		
K_2O 0.2		
1	*0.8*	*4*

الجدول (5-4)جدول يبين نتيجة حل السؤال و بيان المئوية المستخدمة في خلطة التزجيج

R.M	المواد للخلطة	النسبة المستخدمة
1	Na_2O .$2B_2O_3$: Boraxالبوراكس	% 42
2	$CaCO_3$: Whitingكربونات الكالسيوم	% 4
3	k_2O . Al_2O_3.$6SiO_2$: Potash F.فلسبار بوتاسيوم	% 21
4	Al_2O_3.$2SiO$.$2H_2O$طين صيني (كائولين) China Clay	% 29
5	SiO_2 : Flint سليكا (رمل)	% 4
		% 100

اسئلة الفصل الخامس

1- ميز أي من الاكاسيد التالية هي حامضية ، مساعدة على الصهر، مثبتات:

Fe_2O_3, MgO, TiO_2, Cr_2O_3, ZrO_2

2- ما فائدة المركبات التالية في خلطات التزجيج:

فلدسبار البوتاسيوم ,PbO , B_2O_2، الفلنت؟

3- ما الفرق بين اضافة فلدسبار الصوديوم وفلدسبار البوتاسيوم الى خلطات التزجيج؟

4 -حضر وصفة تزجيج تحتوي على مركب الرصاص الجاهز مع اثنين من المركبات القلوية ليكون التزجيج لماعاً و بدرجة حرارة عالية ضمن حدود (Earthen Ware) .

5- حضر صيغة تزجيج تحتوي على ثلاثة اجزاء قاعدية قلوية كي ينضج التزجيج بدرجة حرارة عالية بحدود (Earthen Ware) ويصبح معتماً .

الفصل السادس

الحراريات

(Refractories)



أهداف الفصل السادس :

من المتوقع أن يتعرف الطالب على :

1- تصنيفات المواد الحرارية .

2- أنواع المواد الحرارية.

3- تطبيقات الحراريات.

محتويات الفصل السادس

(1-6) مقدمة في الحراريات

(2-6) طرق تصنيف الحراريات

(3-6) خواص الحراريات

(4-6) تصنيع الحراريات:(المسلك التكنولوجي لصناعة الحراريات)

(5-6) أنواع الحراريات

(6-6) تطبيقات الحراريات

(6-1) مقدمة في الحراريات

الحراريات هي مواد تستخدم في مختلف أنواع الأفران المصنعة . إذ تكون لها قابلية للعزل الحراري بدرجات حرارية مرتفعة ، ولها القابلية على المحافظة على خواصها تحت تأثير الظروف التشغيلية . إذ تعمل أجهزة الحراريات فوق ($1000\ ^oC$) ، لذلك تم استعمالها في بناء وتبطين الأفران والمراجل التي تعمل بدرجات حرارية لا تقل عن($1000\ ^oC$) ، كالمستعملة في صناعة المواد السيراميكية وفي صناعة الحديد الصلب والإسمنت والزجاج، كما تستعمل في تبطين المراجل البخارية وأبراج التصفية المستعملة في الصناعات النفطية والبيتروكيمياوية .وتمتاز بدرجة تليينها المرتفعة (Softening Point) التي تصل إلى أكثر من ($1540\ ^oC$) ، والحراريات هي مواد تقاوم تأثير حرارة المحيط باحتوائها طاقة حرارية للمعادن ، وأنواع الحراريات المستخدمة في التطبيقات العملية يعتمد على المستلزمات الحرجة للاستخدام.

إن الأهداف من استعمال الحراريات في التبطين هو:-

<u>أولاً</u>:- حصر الحرارة داخل المفاعل الحراري (الفرن) والحيلولة دون تسربها إلى المحيط الخارجي.

<u>ثانياً</u>:- توفير ظروف عمل ملائمة تمكن العامل أو الفني من مراقبة وتتبع العمليات الصناعية داخل الفرن وذلك بجعل درجة الحرارة في السطح الخارجي للفرن لا تزيد عن ($40\ ^oC$) مهما كان مقدار درجة الحرارة داخل الفرن.

<u>ثالثاً</u>:- الهدف الثالث هو حماية الإطار الخارجي للفرن من الانصهار والالتواء نظراً إلى أن المعدن الداخل في تركيبه وهو الحديد الصلب قابل للتغيير بارتفاع درجة الحرارة.

<u>رابعاً</u>: عدم تفاعلها الكيمياوي عند درجات الحرارة المرتفعة داخل الفرن.

ولتحقيق هذه الأهداف هناك خواص لابد من توافرها في الحراريات هي مقاومة الدرجات الحرارية العالية والمؤثرات الميكانيكية والغازات والأبخرة المتحررة داخل الفرن.

إن الظروف المختلفة المتنوعة المستعملة فيها الحراريات جعل من الضروري صناعة الحراريات بخواص مختلفة اعتماداً على المواد الأولية واختبارها بخواص معينة ثابتة وأعدادها وتهيئتها بأشكال تلبي المتطلبات الخاصة بالمحيط الذي تستعمل فيه. وعلى سبيل المثال فأن الطابوق الناري المستعمل في تبطين المواقد المنزلية غير ملائم للاستعمال في تبطين أفران الزجاج التي يتم فيها صهر الزجاج في الدرجة الحرارية ($1500\ ^oC$) تقريباً لذا فإنَّ اختيار النوع الملائم له تأثير في سلامة هذه الأجهزة.

لقد كان للدراسات الحديثة دور كبير بإدخال المواد الحرارية في صناعة أجزاء مهمة من المحركات النفاثة والصواريخ وسفن الفضاء حيث تكون هذه الأجزاء مصنوعة من مواد مركبة (Composite material) تدخل الحراريات في تركيبها لإعطائها مواصفات حرارية وميكانيكية وفيزيائية لا يمكن الحصول عليها من مواد أخرى.

فالحراريات هي مواد تحافظ على استقرارية خواصها المختلفة عند درجات الحرارة العالية، وهي قادرة على مقاومة التلف الفيزيائي والتآكل بوساطة المواد الكيميائية المهاجمة. وتمتاز الحراريات بدرجة انصهارها العالية، وتكون أغلبها عازلة عند درجات الحرارة المرتفعة كذلك لها القابلية للصمود أمام التلف الميكانيكي الناتج عن الحمل، هذا فضلاً عن أن مواردها الأولية متوفرة بشكل كبير في الطبيعة وخاصة الأكاسيد مثل (SiO_2 ، MgO ، CaO) ويوضح الجدول (6-1) بعض المواد الحرارية مع درجات انصهارها.

جدول (6-1) بعض الحراريات ودرجات انصهارها

Cristobalite	SiO_2	1710 ^oC
Corundum	Al_2O_3	2050 ^oC
Periclase	MgO	2800 ^oC
Lime	CaO	2570 ^oC
Mullite	$3Al_2O_3.2SiO_2$	1810 ^oC
Forsterite	Mg_2SiO_4	1890 ^oC
Spinel	$MgAl_2O_4$	2135 ^oC
Chromite	$FeCr_2O_4$	2180 ^oC
Carborundum	SiC	2200 ^oC
Graphite	C	3500 ^oC
Zircon	$ZrSiO_4$	2550 ^oC
Zirconia	ZrO_2	2720 ^oC
Beryllia	BeO	2520 ^oC
Thoria	ThO_2	3030 ^oC

وتعد الأكاسيد من أهم الحراريات المعروفة، و تكون خاملة عندما تسخن بوجود الهواء وهنالك عدد كبير من المواد الحرارية مثل الكاربيدات(Carbides) والنتريدات

(Nitrides)والبوريدات (Borides) وهي مواد ذات مقاومة جيدة للحرارة، ولكن استعمالها قليل جداً وذلك بسبب كلفتها العالية وعدم استقراريتها تجاه الأوكسجين.

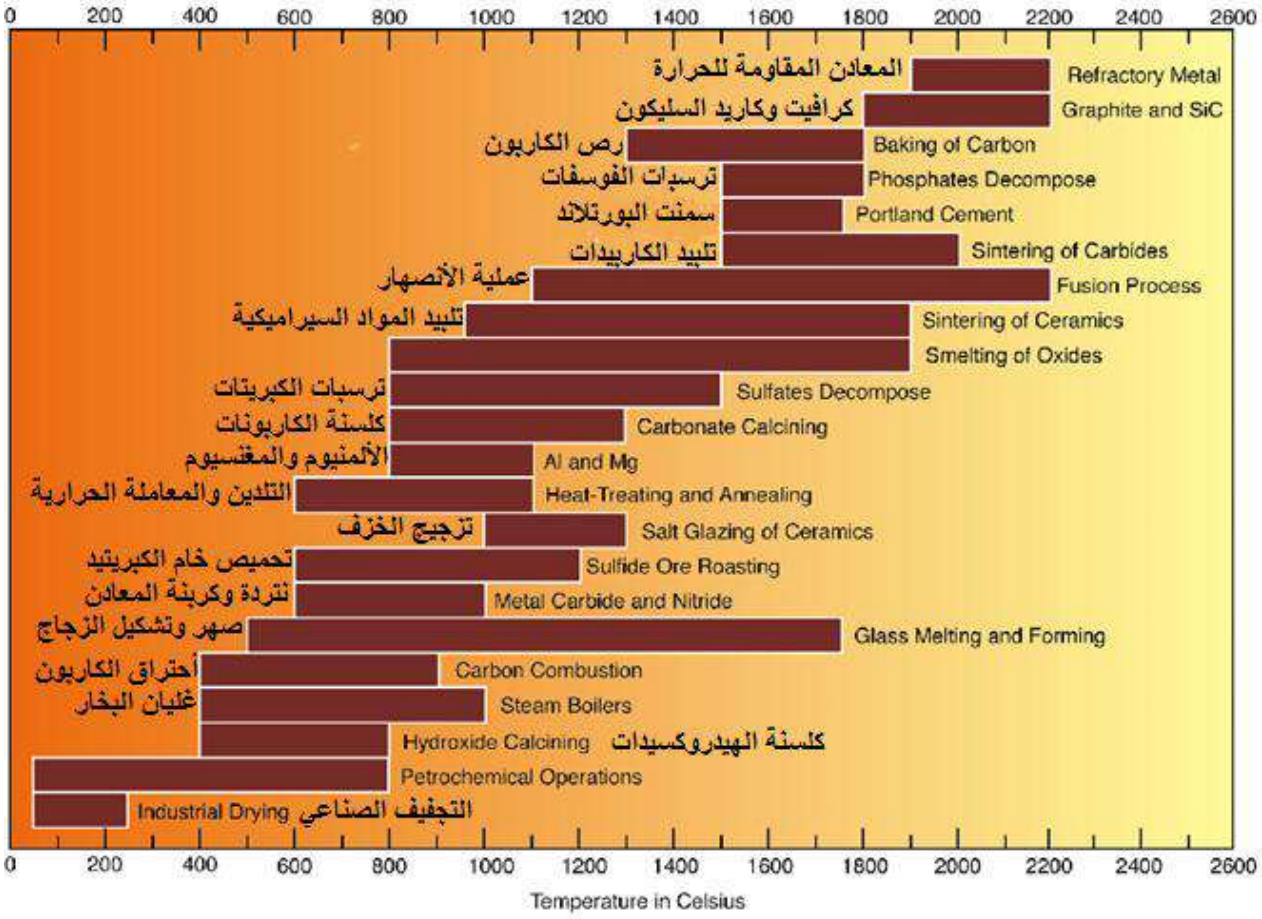
(2-6) طرق تصنيف الحراريات

تصنف المواد الحرارية إلى ثلاث مجموعات بالاعتماد على المديات الحرارية لانصهارها وكالآتي:

1- مواد حرارية تنصهر عند 1580 ºC – 1780.
2- مواد حرارية تنصهر عند 1780 ºC – 2000.
3- مواد حرارية تنصهر بأعلى من 2000 ºC .

وداخل كل مجموعة من هذه المجموعات الثلاث هنالك عدد من الأصناف الفرعية التي ترتب حسب تركيبها الكيميائي والوظيفة والخواص الفيزيائية مثل الكثافة والمسامية ... الخ .

تستعمل المواد الحرارية في صناعة الأفران (Furnaces) والاتونات (Kilns) والمواقد (Stoves) والمجففات (Driers) والأجزاء الحرجة في المحركات النفاثة (Jetengines) ويبين الشكل (1-6) مديات درجات الحرارة للتطبيقات الصناعية للمواد الحرارية.



شكل (6-1) مديات درجات الحرارة لتطبيقات المواد الحرارية الصناعية

وهنالك تصنيفان أساسيان للحراريات هي الحراريات الطينية (Clay) وغير الطينية (Nonclay). تنتج الحراريات الطينية من الطين الناري (Fireclay) والالومينا بنسبة (57إلى87.5)% ، وهناك مواد طينية أخرى تستعمل في إنتاج الحراريات تتضمن الكاؤولين، البنتونايت، الطين الكروي (Ballclay) وغيرها، أما الحراريات غير الطينية فهي تنتج من مركبات الالومينا بنسبة أكثر من87.5 % والمولايت والكرومايت والمغنسايت والسليكا وكاربيد السليكون والزركون والمواد غير الطينية الأخرى، وكذلك يمكن تصنيف الحراريات بالشكل الآتي:

(6-2-1) التصنيف المعتمد على التركيب الكيمياوى

يوضح الجدول(6-2) نموذج لتصنيف الحراريات اعتماداً على الصيغة الكيمياوية، ويشتمل هذا النوع على:

المادة	التصنيف	درجة الانصهار التقريبية ^{o}C
سليكا	Acidحامضية	1710
الطين (الكاولين)	(Acid)حامضية	1770
الالومينا	(Acid)حامضية	2050
مولايت	(Acid)حامضية	1810
السليمينايت	(Acid)حامضية	1850
الكرافيت	(Neutral)متعادلة	3700
أوكسيد الكروم	(Neutral)متعادلة	2430
أوكسيد الزركونيوم	(Neutral)متعادلة	2720
أوكسيد المغنيسيوم	(Neutral)متعادلة	2800
أوكسيد الكالسيوم	(Neutral)متعادلة	2570
أوكسيد الباريوم	(Neutral)متعادلة	1920

جدول (6-2)

الأنواع السليكونية:

ويحتوي نسباً عالية من أوكسيد السليكون (SiO_2) زيادة على كميات مختلفة من أوكسيد الألمنيوم وقليلاً من أوكسيد الحديد وقليلاً جداً من أكاسيد المغنيسيوم والكالسيوم وأهمها.

1- الطابوق عالي السليكا(High Silica Bricks)

2-الطابوق السليكوني(Silica Bricks)

3- الطابوق الناري الألوميني (Aluminous Fire Bricks)وتتراوح نسبة الألومينا فيه بين (15-52%)،

كما يوضح الجدول (6-3) الأنواع المختلفة من الطابوق الناري.:-

1- طابوق المغنسايت(Magnesite Bricks)

ويحتوي نسبة عالية من أوكسيد المغنيسيوم.

2- طابوق الكروم- المغنسايت(Chrome-Magnesite)

وتتراوح نسبة أوكسيد المغنيسيوم فيه بين (55-80%).

3- طابوق السليمانايت (Silimanite Bricks)

ويحتوي نسبة عالية من أوكسيد الألمنيوم.

4- طابوق الكاربوندوم(Carabrundum Bricks)

ويحتوي على (90%) من كاربيد الكالسيوم.

5- الطابوق الدولوميتي (Dolomite Bricks)

وهو خليط من أكاسيد الكالسيوم والمغنيسيوم.

(6-2-2) التصنيف المعتمد على مصادر المواد الأولية

تصنف الحراريات ومنها الطابوق بالاعتماد على مصادر المواد الأولية التي يصنع منها وهي:-

1- الطابوق الناري المصنوع من مواد أولية طبيعية مثل [الطابوق الطيني المغنيسي والألوميني وكذلك الكروم مغنسايت] وتحتاج هذه الصناعة إلى بعض العمليات التي تجري على هذه المواد الأولية.

2- الطابوق الناري للاستعمالات الخاصة، (الألومينا وكاربيد الكالسيوم) وتحضر من مواد أولية محضرة صناعياً من مواد أولية طبيعية، وكما يوضح الجدول (3-6)إنموذجاً لهذه الأنواع.

جدول (3-6) الأنواع المختلفة من الطابوق الناري

النوع	المكون الغالب	نقطة التليين		أعلى درجة حرارة تستعمل عندها °C
		رقم مخروط سيجر	°C	
الطابوق الناري واطئ الألومينا	Al_2O_3 (%30-8)	31-20	1695-1540	1350-1200
الطابوق الشاموت نوع (A)	Al_2O_3 (%44-30)	34-30	1700-1630	1450-1350
حراريات الألومينا	Al_2O_3 (%56-44)	37-35	1830-1780	1550-1450
حراريات عالية الألومينا	Al_2O_3 (أكثر من-56%)	42-36	1980-1805	1850-1500
حراريات السليكات	SiO_2(أكثر من 93%)	34-32	1730-1710	1700-1500
الحراريات القاعدية	MgO (أكثر أو يقدر 80%)	42	1980	1850-1550
1-المغنيسيا	MgO (%80-55)	42	1980	1750-1550
2-المغنيسيا-الكرومايت	MgO (%55-25)	42	1980	1750-1550
3-الكرومايت-المغنيسيا	MgO (%55-25) MgO (أقل أو مساو 25%)	40	1900	1600-1500
الدولوميت	أكثر أو Cr_2O_3 25% مساوي	اكثر من34	أكثر من1700	1800-1500

(6-2-3) التصنيف المعتمد على درجة حرارة التليين

حيث تصنف الحراريات اعتماداً على درجة التليين.

1- المواد البسيطة Simple material هي التي تنصهر في درجة حرارة بين (1770-1580)^{o}C.

2- الحراريات العالية (Highly Refractory) هي التي تنصهر بين (2000-1770)^{o}C.

3- الحراريات الفائقة (Super Refractory) ويستعمل للمواد التي تنصهر في درجات حرارة أعلى من (2000)^{o}C.

(6-2-4) التصنيف المعتمد على طريقة التصنيع

ويشتمل هذا النوع على:

1- الطابوق الناري المصنوع بالطريقة اللدنة Plastic Moulding.

2- الطابوق الناري المصنوع بطريقة الضغط Moulding Pressing.

3- الطابوق الناري المصنوع بطريقة الصب Moulding by Casting.

(6-2-5) التصنيف المعتمد على درجة المسامية

ويشمل هذا النوع على:

1- الطابوق الناري الخفيف:- ويمتاز هذا النوع من الطابوق الناري بارتفاع مسامية إلى أكثر من 85%.

2- الطابوق الناري العادي: حيث يمثل أغلب أنواع الحراريات وتتراوح مسامية 15-28%.

4- الطابوق الناري الكثيف: يمتاز هذا النوع من الطابوق بانخفاض مسامية 2-5% حيث يستعمل في أفران إنتاج الغازات ومنصهرات المعادن الفلزية حيث يجب أن يتميز الطابوق

النـاري في هذه الأماكن بمقاومة عالية لنفوذ الغازات ومنصهرات المعادن الفلزية. فيتم تقليل المسامية في الطابوق النـاري بشتى الطرائق مثل تشكيل الطابوق بطريقة الكبس والضغط المرتفع زيادة على استعمال مواد هيدروكربونية كمواد رابطة في أثناء التشكيل، حيث تُخلّف هذه المواد بعد الحرق نسبة كافية من الكربون تؤدي إلى غلق المسامات.

(3-6) خواص الحراريات

تمتلك المواد الحرارية الخواص الاتية:

1- المقاومة الحرارية(Refrctoriness).

2- الروابط السيراميكية (Ceramic bonds).

3- الاستقرارية البعدية(Dimentional stability).

(1-3-6) المقاومة الحرارية

هي قدرة المادة على الصمود أمام الحرارة دون حدوث أي تشوه تحت ظروف التشغيل، فبالاعتماد على درجات الحرارة فإن درجة حرارة نقطة التلين Softing point (أقل درجة حرارية تصبح المادة عندها قاسية rigid بالكامل) أو درجة حرارة نقطة الانصهار تعبر عن مقياس المقاومة الحرارية للمادة.

تقاس المقاومة الحرارية تطبيقياً بمقارنة تصرف المادة المشكلة باستعمال مخاريط سيجر مع مخاريط من مادة أخرى قياسية تمتلك نقاط تلين معلومة، تسخن سوية تحت ظروف تشغيل مسيطر عليها. يتم تسجيل النتيجة بوساطة مقياس Pyrometric cone equivalent (PCE)، الذي يعني ببساطة رقم المخروط الذي يظهر أقرب تطابق للمخروط الخاضع للاختبار خلال زمن التلين.

وتشمل الخواص الحرارية أيضاً:

1. الثبات الحراري (Thermal Stability):

تميل المواد الحرارية إلى التقلص والتمدد لدى تعرضها للتسخين والتبريد أثناء الاستعمال وهذا لا يرجع إلى سلوك المادة البنائية الفيزياوي فقط وإنما يعزى إلى التغير في البنية المعدنية أيضاً نتيجة التفاعلات الكيمياوية والفيزياوية وكذلك تعتمد هذه الخاصية على عدة عوامل منها نوعية المادة الأولية، التدرج الحبيبي، طريقة التشكيل والضغط المستعمل ... الخ.

وبما أن الحراريات تتعرض أثناء الاستعمال إلى درجات حرارية قد تكون بعضها أعلى من تلك الدرجات الحرارية المستعملة في مراحل الحرق (إحدى مراحل إنتاج الحراريات ذاتها) لذا ينبغي توافر مقاومة عالية لها تجاه هذه الظروف فتتعرض الحراريات إلى ما يسمى التقلص ما بعد التبريد (After contraction) وبعد التمدد (After Expansion) وهو يمثل التغير الحجمي الذي يحدث للمواد الحرارية عند تعرضها لدرجة الحرارة.

2.مقاومة التغير الحراري المفاجئ (Thermal Shock Resistance):

تعرف هذه الخاصية بقابلية المادة الحرارية وقدرتها على استرجاع شكلها الأصلي دون حدوث تشقق أو تكسر عند تعرضها إلى تغير حراري مفاجئ.

والأسباب التي تؤدي بالمادة الحرارية إلى الضعف في مقاومة التغير الحراري المفاجئ والمعاناة من التكسر والتفتت هي:-

1. **التدرج الحراري خلال المادة الحرارية.**
2. **الضغط الحاصل بالبطانة الحرارية بسبب التغير الحجمي أثناء الاستعمال (عند التعرض إلى التمدد الحراري).**
3. **إجهادات أخرى ذات فعل ميكانيكي، حيث إنّ مهمة توافر جسم حراري متجانس ذي خواص متساوية من جميع جهاته لا يعاني إجهاداً حرارياً أو تمدداً حرارياً ، تكون صعبة جداً بسبب أن معظم الحراريات المستعملة في التبطين لا تتوفر فيها مثل هذه المميزات المثالية ، فالتركيب الأساسي للحراريات ذاتها تمتلك إجهادات ثابتة وتتزايد إجهادات الانضغاط عندما يحدث تغيراً**

في أبعاد المادة الحرارية خلال التعرض الحراري ، وعند حدوث تمدد في المادة الحرارية يظهر في المادة إجهاد يسمى إجهاد الشد (Tensile stress) ويزداد هذا النوع من الإجهاد في التبريد وتعاني المادة تقلصاً في هذه الظروف وعندما يصل مقدار هذا الإجهاد إلى أعلى من إجهاد القص وإجهاد الشد (Tensile strength) للحراريات تتكسر المادة الحرارية.

الاختلاف في معامل التمدد الحراري لطبقات الطابوق الناري ويحدث هذا بسبب كثرة الاستعمال وما يرافقه من ظروف مثل تكون طبقة الخبث (Slagging) على سطح المادة الحرارية، زيادة على التغير الحاصل بالتراكيب بسبب نفوذ الغازات (المتكون من العملية الصناعية) التي تجري داخل الفرن إلى داخل المادة الحرارية المبطنة للفرن حين تحدث تفاعلات كيمياوية بين هذه الغازات ومادة الجسم الحراري بوجود العامل المساعد (المادة الحرارية ذاتها) محدثة تغيراً في كثافة المادة الحرارية (الطابوق الحراري).

3. نقطة التليين (Softening Point)

تختلف الحراريات والمواد السيراميكية عن المواد الفلزية والمعدنية في تفسير مفهوم الإنصهار، فالحراريات تتصف بمدى أوسع من درجات الانصهار، والسبب في ذلك هو أن التماسك بين ذرات المواد الحرارية والسيراميكية، يتم نتيجة قوى التماسك الأيونية والتساهمية وقوى (فاندفالز) حيث تشترك هذه الأنماط من الأواصر في المكون الواحد من الحراريات ونتيجة لاختلاف قوى الترابط لهذه الأواصر فأنها فيما إذا تعرضت المادة الحرارية إلى ظروف تسخين عالية ونتيجة لذلك لا تنصهر في آن واحد كما يحصل للفلزات إنما يحصل تدرج في فعالية الانصهار معتمداً على درجة حرارة التعرض التي تعاني منها المادة الحرارية.

إن مصطلح مقاومة التليين يمثل قابلية المادة الحرارية على تحمل تأثير الحرارة عند تعرضها لدرجات حرارية عالية دون حدوث انصهار فيها حيث بعد التسخين وعند درجة حرارة تعتمد على طبيعة مكونات المادة الحرارية يبدأ الطور السائل بالتكون وبزيادة الطور السائل تتدهور المادة الحرارية نتيجة لفقدان قوى التماسك والتلاصق بين حبيباتها، أن طبيعة وكمية السائل المتكون تعتمد على :

1. المكونات والكيميائية. 2 . المقاس الحبيبي. 3. المسامية. 4. سرعة الحرق.

(6-3-2) الروابط السيراميكية

يمكن أن تُعرف على أنها الطور الزجاجي المتكون أثناء تبريد السائل المتكون من المركبات القابلة للانصهار داخل الخليط أثناء الحرق. إن زيادة هذه الروابط يزيد من الاستقرارية الحجمية (البعدية) للمنتج عند استعماله بدرجات حرارية عالية.

إن وجود الروابط السيراميكية يؤدي إلى ازديادٍ كبيرٍ في مقاومة الشد ويقلل من المقاومة الحرارية لذلك ففي التطبيقات التي تحتاج إلى مقاومة عالية لدرجات الحرارة يجب أن تكون كمية الطور الزجاجي أقل بالمقارنة مع الحراريات المستعملة في التطبيقات التي تكون فيها صفة مقاومة الشد هي المطلوبة. إن التحكم بالطور الزجاجي المتكون داخل المادة يكون بوساطة التحكم بمعدل التبريد للعينات المحروقة.

(6-3-3) الاستقرارية البعدية

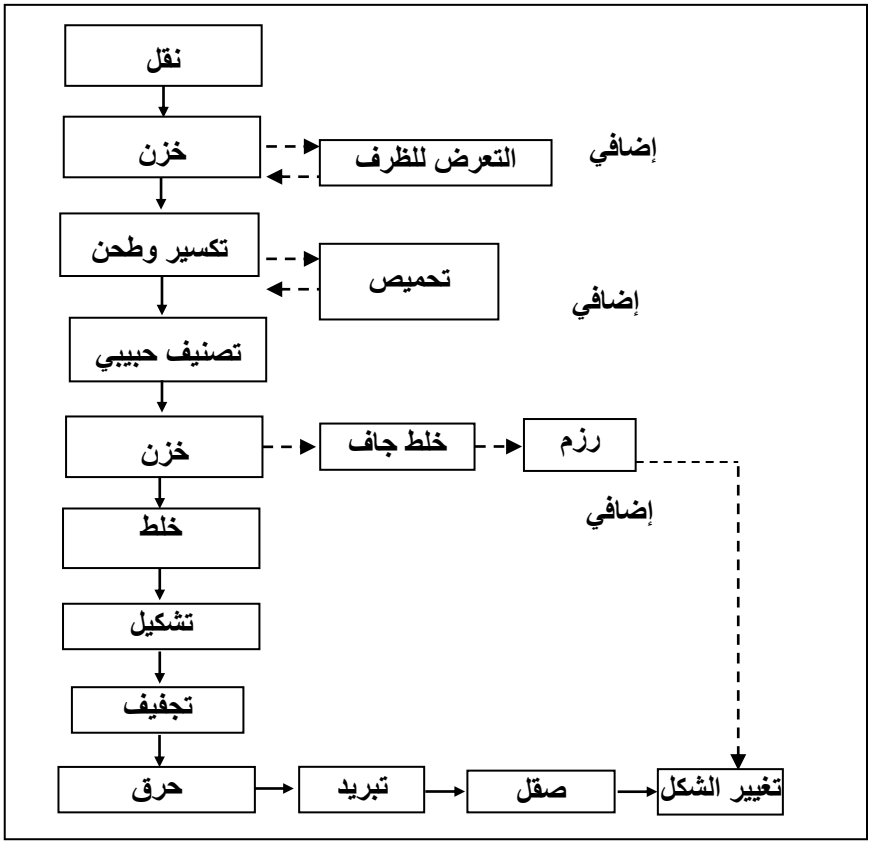
يمكن تعريفها على أنها المقاومة التي تبديها المادة تجاه أي تغيير بالحجم عندما تتعرض إلى درجات حرارة عالية لمدة طويلة.

إن المواد الحرارية تميل إلى التقلص أو التمدد عند التسخين ليس فقط بسبب التصرف الفيزيائي الطبيعي لأي مادة مركبة ولكن كذلك بسبب التفاعلات الفيزيوكيميائية والتلبيد وأي تأثير يحصل خلال الحرق، وعملية التسخين والضغوط الناتجة عن وزن أجزاء الفرن والصدمة الحرارية (Thermal shock) الناتجة عن التسخين السريع أو التبريد السريع والاجهادات الأخرى الناتجة عن التغير في درجات الحرارة والتلف الميكانيكي الناتج عن حركة محتويات الفرن والتأثير الكيميائي بوساطة الأجسام (الصلبة أو السائلة أو الغازية) الساخنة، كل هذه الظروف تسهم في حصول تغيرات في أبعاد القطعة الحرارية، لذلك فإن المواد الحرارية يجب أن تمتلك مقاومة كافية تجاه تلك الظروف.

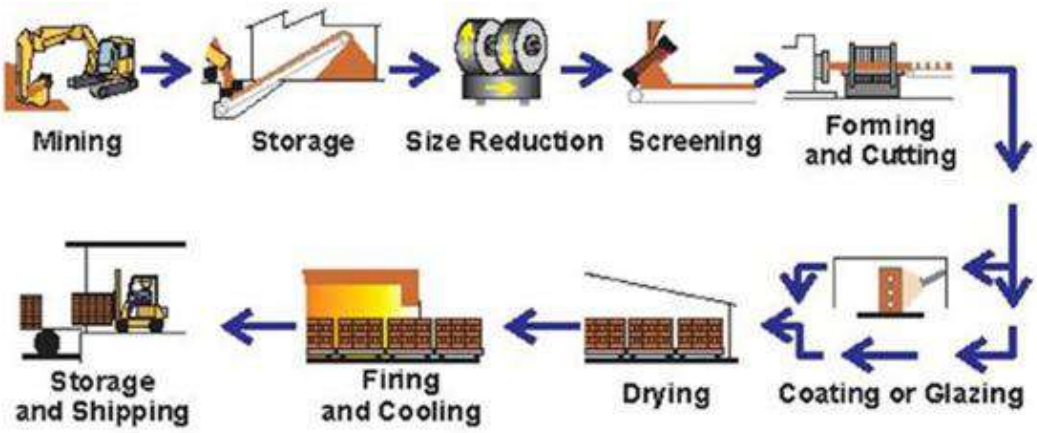
(4-6) تصنيع الحراريات:(المسلك التكنولوجى لصناعة الحراريات)

تتضمن صناعة الحراريات أربع عمليات هي تهيئة المواد الأولية Raw Material Processing التشكيل Forming الحرق Firing والعمليات النهائية Final Processing والشكلين(6-2)، (6-3) يوضحان خطوات صناعة الحراريات.

تتضمن تهيئة المواد الأولية التكسير Crushing والطحن Grinding، متبوعة بالتصنيف الحجمي size Classification أو ما يسمى بالنخل (Sieving) والتجفيف (Drying) إذا كان ضرورياً، أحياناً تخلط مع مواد ومركبات كيميائية أخرى بعد ذلك تكبس وتكون على شكل منتج، والعمليات التي تتبع النخل قد تكون غير مطلوبة في بعض أنواع الحراريات. أما التشكيل فيتضمن خلط المواد الأولية وتشكيلها بأشكال مرغوب بها، هذه العملية تحدث تحت ظروف الترطيب (under wet).في حين يتضمن الحرق تسخين المادة إلى درجات حرارية عالية لتشكيل الأواصر السيراميكية التي تعطي المنتج خواصه الحرارية.



شكل (6-2): يوضح المسلك التكنولوجي لصناعة الحراريات.



شكل (3-6) المسلك التكنولوجي لصناعة الحراريات

يعرف المسار التكنولوجي لتشكيل الأجسام السيراميكية ومنها الحرارية بالخطوات الاتية:

(1-4-6) الطحن(Milling)

تعرف على أنها تقليل الحجم الحبيبي بوساطة قوى ميكانيكية لها دور أساسي في الحصول على توزيع حجم حبيبي مناسب للمنتج، وتأتي هذه العملية عادة بعد التكسير.

هنالك العديد من وسائل الطحن فمنها على سبيل المثال الطحن بالقضبان (rod mill) والطحن بالكرات (ball mill) والطحن بالالة الساحنة القرصية والطحن بالمطرقة وغيرها. تعد عملية الطحن بالكرات هي الأكثر استعمالاً لسهولة العمل بها، وطواحين الكرات هي عبارة عن أواني (حاويات) بورسلينية مزججة بداخلها كرات مصنوعة من الالومينا اسطوانية الشكل تدور بشكل أفقي محوري بوساطة قضيبين اسطوانيين يدوران بوساطة محرك كهربائي . إن ميكانيكية الطحن تتم من حركة سقوط الكرات على المادة المراد طحنها جراء دوران الحاوية ، وللحصول على فعالية عالية ونتائج أفضل للطحن لابد من اختيار حجم حاوية مناسب لحجم المادة المراد طحنها وكذلك حجم وعدد كرات الطحن وسرعة الطحن ، فضلاً عن الأخذ بالحسبان بعضاً من العوامل المهمة عند الطحن منها مدة الطحن للوصول إلى الحجم الجسيمي المطلوب.



شكل (6-4) مطحنة

(2-4-6) النخل (Sieving)

تعرف هذه العملية على أنها عملية التصنيف الحجمي للجسيمات، إذ تستعمل تقنية النخل شكل (6-3) للسيطرة على مدى حجم الحبيبة. إن الحجم الحبيبي للمساحيق له تأثير كبير في تحديد خواص المنتجات الحرارية لأنه يؤثر في المساحة السطحية للتلامس بين الحبيبات التي تعد عاملاً مهماً في التفاعلات الكيميائية وعملية التلبيد، إذ يمكن التحكم بمسامية المنتج من خلال اختيار الحجم الحبيبي.



شكل (6-5) منظومة صناعية لنخل المساحيق

(3-4-6) الخلط (Mixing)

هي عملية خلط المواد الخام المختلفة بنسب ودرجة نعومة معينة، وإنتاج خليط يحتوي على نسبة من الماء والقوام المطلوبين. ويعد الخلط مرحلة مهمة من مراحل التصنيع وذلك كي تتجانس المواد الخشنة والمتوسطة والناعمة بشكل جيد وبنسب معينة معطية الجسم الخواص الفيزياوية والميكانيكية الضرورية.

(4-4-6) الترطيب (Wetting)

تتطلب صناعة المواد الحرارية كصناعة الطابوق ، والحراريات وغيرها إضافة الماء إلى الخلطة لتسهيل عملية تشكيلها . ولكل نوع من أنواع الخلطات حد معين لكمية الماء المضافة فإذا زادت عن هذا الحد تصبح العجينة أقرب إلى الحالة السائلة ويصعب تشكيلها فضلاً عن ظهور مشاكل التجفيف والحرق، إذ تحتاج هذه العمليات إلى طاقة إضافية تبخر الماء أثناء التجفيف. أما إذا قلت كمية الماء المضافة فتصبح المادة ضعيفة التشكيل غير متماسكة. أما إذا أضيف الماء ضمن الحدود المسموح بها فنحصل على لدونة جيدة (Plasticity) وتعرف اللدونة على أنها

قدرة المادة الصلبة على التفاعل مع القوى الخارجية المؤثرة فيها بحيث يبقى التغير الحاصل في شكل المادة ثابتاً شرط ألا تكون هذه التغيرات مصحوبة بتشققات.

(5-4-6) عملية الكبس (Compressing)

يقصد بعملية الكبس، عملية تصنيع الأجسام الحرارية والسيراميكية بشكل وأبعاد معينة، وهناك طرائق عدة لتحضير النماذج الحرارية من أهمها: (تمثل النسب ما بين القوسين نسبة الرطوبة في كل طريقة).

1- الطريقة اللدنة (Plastic method)(18 – 22)%
2- الطريقة شبه الجافة (4 – 9)%(Semi-dry pressing)
3- طريقة الكبس الجاف (0 – 4)% (Dry pressing)
4- طريقة الصب الانزلاقي (25 – 30)% (Slip casting)

تكمن أهمية الكبس في تحديده مقدار رص الحبيبات المسؤولة عن الخواص الميكانيكية والفيزيائية.

(6-4-6) التجفيف (Drying)

هو معاملة الأجسام الرطبة حرارياً ولمدة زمنية معينة وفي درجات حرارة تتراوح بين (105 – 50) °C وبحسب نوع المادة الأولية ونسبة الرطوبة فيها إذ تكون نسبة الرطوبة في النماذج المجففة (2 – 25)% من الرطوبة الابتدائية.

يحدث التجفيف على مرحلتين، يتم في المرحلة الأولى فقدان الماء الموجود في المسامات فينقل الماء من خلال المسامات إلى سطح الحبيبات ليحل محل الماء الذي تبخر من السطح ويحل الهواء محل الماء الموجود في المسامات، أما في المرحلة الثانية ففيها يفقد الماء المشكل للطبقة العازلة بين دقائق المادة.

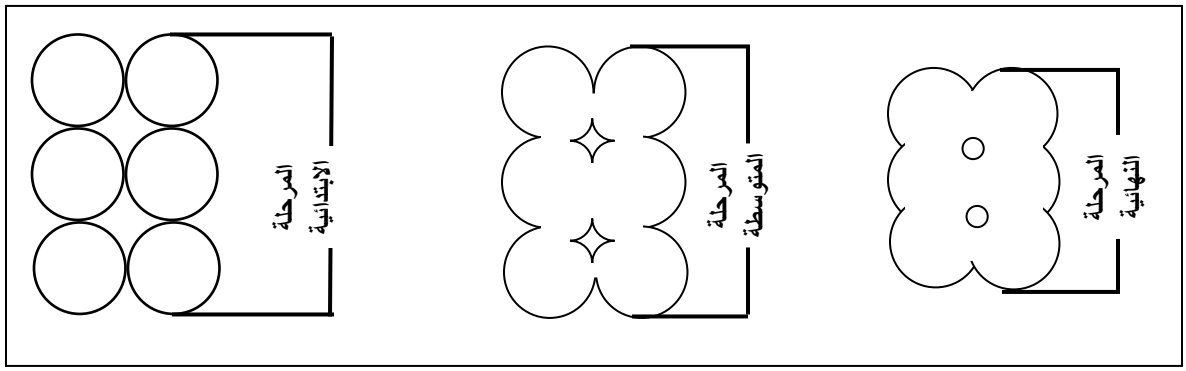
(7-4-6) التلبيد (Sintering)

هو عملية معاملة حرارية تجري على المادة المتبلورة أو غير المتبلورة لتحويلها إلى مادة متماسكة واكتسابها خاصية مقاومة الانضغاط، ومن الظواهر التي تحصل في أثناء مرحلة التلبيد ظاهرة التقلص Shrinkage والنمو الحبيبي Grain Growth وتقلص المسامات Pore shrinkage. والتلبيد للمواد السيراميكية الذي نوقش في الفصل الثاني يسري على الحراريات.

وباختصار فأن لعملية التلبيد أهمية كبيرة في تأثيرها على خواص المنتج كالمتانة والموصلية الحرارية ... الخ، فمثلاً المواد الحرارية تزداد مقاومتها الميكانيكية بعد عملية التلبيد التي تحدث بثلاث مراحل.

- المرحلة الابتدائية: وفيها يتغير شكل المسامات فتصبح على شكل قنوات أو كرات معزولة وهذا بسبب تكون الأعناق (Necks) على نقطة تماس الجسيمات، وليس من الضروري تغيير حجمها، وبعدها تصبح المسامات أكثر كروية في الشكل وأصغر في الحجم باستمرار عملية التلبيد وتبقى الحبيبات المختلفة متميزة.
- المرحلة المتوسطة: وفيها تتسع الأعناق ويتكون تركيب له ثقوب متواصلة.
- المرحلة النهائية: خلال هذه المرحلة تنعزل الثقوب ويتلاشى الاتصال بين الثقوب مما يؤدي إلى نهاية الانتقال عن طريق السطح أو التبخر. كما أن التحام الحبيبات والنمو الحبيبي يؤديان إلى تناقص الطاقة السطحية.

ويوضح الشكل (6-6) التغيرات الحاصلة في شكل وحجم كل من المسامات والحبيبات والتقلص.



شكل (6-6) يوضح التغيرات الحاصلة في شكل وحجم كل من المسامات والحبيبات والتقلص اثناء التلبيد

إن السبب الرئيس لحدوث التلبيد يعود إلى التركيب الأساس للبلورة إذ أن الذرات على سطح المادة لها طاقة أعلى من تلك التي في كتلة المادة لأنها ترتبط من جهة واحدة بالذرات الأخرى ولذلك تكون في حالة غير متوازنة وكلما كانت المساحة السطحية للنموذج أكبر تكون النسبة بين الذرات على السطح الى الذرات الداخلية أكبر وبذلك تكون الطاقة السطحية للمسحوق أكبر وبعد عملية الحرق تنخفض هذه الطاقة السطحية بشكل كبير. إن هذا الانخفاض في الطاقة هو القوة الدافعة لعملية التلبيد.

(5-6) أنواع الحراريات

أعتماداً على الطبيعة الكيميائية للمكونات الأساسية للحراريات (غالباً ما تكون الأكاسيد ومركباتها) فإن الحراريات تصنف إلى ثلاث مجموعات هي:

1- الحراريات الحامضية (Acid Refractories):-

هي التي تتركب من مواد حامضية لذلك تكون ثابتة تجاه الحوامض لكنها تتفاعل مع القواعد، ومن الأمثلة على الحراريات الحامضية:

1- حراريات سليكات الالومينا (Alumina Silicate):

تتكون هذه الحراريات عادة من الكاؤولينات ذات الصيغة الكيميائية (Al_2O_3 , $2SiO_2$, $2H_2O$) ومن نسبة قليلة من أكاسيد أخرى مثل اوكسيد الحديد والمنغنيز وأوكسيد التيتانيوم وغيرها.

2- حراريات طابوق السليكا (Silica Bricks):

يحتوي طابوق السليكا الاعتيادي على حوالي (95 – 96)% من SiO_2 وكذلك كميات ضئيلة من الالومينا وشوائب أخرى من أطيان مصاحبة وتزداد مقاومته للحرارة عند إزالة الشوائب، إذ تغسل الصخور المستعملة لإزالة الطين العالق مما يؤدي إلى الحصول على طابوق السليكا بقدرة وكفاءة أداء عاليتين.

3- حراريات الطين الناري (Fire Clay) :

يدخل الطين الناري في جميع أنواع الحراريات الحامضية والمتعادلة والقاعدية وذلك حسب نسبة الالومينا الموجودة فيه فالحامضي منه يحتوي على أقل من 15% الومينا أما الباقي فهو في الأساس سليكا مع كمية ضئيلة من أوكسيد الحديد والكلس والمغنيسيا والقلويات. يمكن أن تتحمل درجات حرارية تتراوح مابين (° C)1600 – 1700 .

وتقسم الأطيان النارية إلى:

<u>أولاً: أطيان لدنة:</u> وهذا النوع سهل التشكيل عند خلطه مع كمية قليلة من الماء وهو الذي نستعمله عادة في الداخل للتبطين ويتحمل درجات حرارة عالية.

<u>ثانياً: الأطيان غير اللدنة:</u> هي على شكل صخور طينية ولا تتحول إلى خليط لدن عند إضافة الماء، وبذلك يقلل خاصية اللدائنية ومن أنواعها طين الفلنت Flint.

وينتج الطابوق من الطين الناري بأشكال وألوان مختلفة ما بين الأصفر والأبيض والأحمر اعتماداً على نسب الأكاسيد المكونة الداخلة في تكوين المواد الأولية أو المضافات.

4- حراريات السليمنايت (Silimantic):

تمتلك الصيغة Al_2O_3 SiO_2 وإذا كانت نقية تحتوي على 61% الومينا ودرجة انصهارها 1850C° ويمكن أن تستعمل كمواد مقاومة للحرارة إلى حد حوالي (^oC 1700).

5- حراريات المولايت (Mullile):

يحتوي المولايت على 72% من Al_2O_3، أما صيغته الكيميائية فهي $2Al_2O_3.2SiO_2$. يصنع طابوق المولايت بصهر المادة الغنية بالالومينا مثل البوكسايت مع الطين أو رمل السليكا بنسب تعطي تركيب المولايت وتستعمل حراريات المولايت كثيراً في معامل الزجاج. يمتلك طابوق المولايت مقاومة عالية تجاه الحمل المسلط كما يمتلك مقاومة عالية ضد التآكل الكيميائي.

6- حراريات عالية الألومينا (High Alumina):

تحتوي هذه الحراريات على (90 – 100)% الومينا وتصل درجة انصهارها إلى (2050 °C) ، وتتراوح درجة التشغيل القصوى لها بين (1700 °C – 1900) ، وتعتمد على نسبة الالومينا في المحتوى، إن هذه الحراريات تكون ذات مقاومة شديدة للحرارة وصلابة ومتانة ميكانيكية عالية وتكون ثابتة أيضاً تجاه المهاجمات الكيمياوية.

7- الطابوق السليكوني (Silica Bricks) :

يصنع هذا الطابوق عادة من حجر كوارتزي حبيبي تسحق مادته الخام وتطحن ثم تصنف إلى أجزاء خشنه ومتوسطة وناعمة بالنخل ويصنع الخليط الناتج بأخذ نسب معينة من هذه الأجزاء ليعطي الكثافة الاكتظاظية المثالية ويضاف الماء ليعطي طيناً ذا قوام لزج ويضاف (1.5%) تقريباً من الجير المطفأ وكمية من محلول الكبريتيد القلوي وينتج الكلس، أن الغرض من محلول الكبريتيد القلوي هو إعطاء الطابوق متانة جفاف قبل الحرق ويكون الجسم ذا ليونة منخفضة جداً. يقولب الطابوق ويجفف وفي هذه المرحلة يكون قابلاً للكسر وينبغي العناية به عند المرور والنقل ، وتُعَدُّ عملية الحرق عملية طويلة بالنظر إلى خطورة تعرض المادة إلى الكسر عند المرور بدرجة حرارة انقلاب كوارتز ألفا-بيتا وانقلاب كرستوبلايت - بيتا أثناء التبريد، ويغمس الطابوق أو يحتفظ به عند درجة الحرارة القصوى لبعض الوقت لضمان تحول معظمه إلى كرستوبلايت، ويُعَدُّ الطابوق المحروق ذا متانة ميكانيكية عالية ويحتفظ بمتانة في درجة حرارة قريبة من درجة الانصهار. وليس أصل هذه المتانة من الآصرة الزجاجية ولكن أصلها يعود إلى تشابك البلورات ويستعمل طابوق السليكا أساساً في حراريات معامل الصلب حيث تبنى به سقوف الأفران المفتوحة وكذلك يستعمل في أفران فحم الكوك وسقوف أفران صنع الزجاج ومن الخواص الظاهرة لهذا الطابوق قابليته لمقاومة الأحمال عند درجات الحرارة العالية ومقاومة تفاعل أوكسيد الحديد معه ويعود انهياره عادة إلى ضعف مقاومته للصدمات الحرارية.

2- الحراريات القاعدية (Base Refractories):

هي التي تتركب بصورة أساسية من مواد قاعدية لذلك فهي ثابتة تجاه المواد القاعدية ولكنها تتفاعل مع الحوامض ومن الأمثلة:

1- حراريات المغنسايت (Magnesite Refractoriy):

تحتوي حراريات المغنسايت على الأقل 85% من أوكسيد المغنيسيوم MgO، الذي ينتج طبيعياً من المغنسايت الطبيعي (كاربونات المغنيسيوم) ($MgCO_3$) وكيميائياً من المغنيسيا الموجودة في مياه البحر. الشوائب الأساسية في هذا النوع من الحراريات هي الحديد والكالسيوم والسليكا. ينصهر أوكسيد المغنيسيوم عند 2800^oC لكن الشوائب الموجودة فيه تضعف مقاومته العالية للحرارة.

2- الكلس (Lime):

الكلس النقي هو أوكسيد الكالسيوم CaO ومقاومته عالية ضد التآكل الناتج من الخبث (slag) إلا أنه قليل الاستعمال وذلك بسبب ميله العالي للهدرجة مكوناً هيدروكسيد الكالسيوم $Ca(OH)_2$ عند درجة حرارة (2350 °C) ، ويمكن التخلص من هذه الحالة بإضافة مواد مقاومة للهدرجة إذ يستعمل أوكسيد الحديد لزيادة مقاومة الهدرجة، أو التسخين بوجود غاز ثنائي أوكسيد الكاربون لتشكيل طبقة كاربونات واقية.

3- حراريات البريليا (Beryllia):

الصيغة الكيميائية للبريليا هي ($3BeO, Al_2O_5 , 6SiO_2$)، و استعمال هذا النوع من الحراريات يكون محدوداً بسبب ميله للتطاير خاصة بوجود بخار الماء، و قد يحدث التطاير حتى في درجات الحرارة الأقل من (1000 °C) ، كما يمتلك أوكسيد البرليوم خواص ميكانيكية عالية وتوصيلية عالية للحرارة. ينبغي الانتباه عند تداول هذه المادة لأنها سامة.

4- حراريات الدولمايت (Dolomite):

صيغته الكيميائية $CaMg(CO_3)_2$، أغلب الدولمايت يتكون من إحلال أيونات المغنيسيوم محل الكالسيوم في الرواسب الكلسية نتيجة لملامسة المياه المعدنية بأيون المغنيسيوم، يتميز الدولمايت ببلوراته الخشنة، ووجود التجاويف والفتحات الناتجة من آثار تفاعل المغنسيوم مع كاربونات المغنيسيوم. يمكن لحراريات الدولمايت أن تحتوي على المركبات الآتية: $2CaO.SiO_2$ و $3CaO.SiO_2$ وMgO و CaO و$2CaO.Fe_2O_3$و$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$و$3CaO.Al_2O_3$.

3- الحراريات المتعادلة (Neutral Refractoris):

وهي التي تكون ثابتة كيميائياً تجاه الحوامض والقواعد ومن أمثلتها:

1- الحراريات الكروماتية (Chromatic Refractories):

الكرومايت (Chromite) مؤلف من أوكسيد الحديد وأوكسيد الكروم وصيغته الكيميائية $FeO.Cr_2O_3$ يحتوي على 32% من أوكسيد الحديد و68% من اوكسيد الكروم إذا كان نقياً، إذ يمكن أن يوجد في الطبيعة على الشكل $(Mg, Fe).(Cr, Al)_2O_3$ و يتوافر هذا الأخير في الطبيعة أكثر من الأول و يمكن استعمال حراريات الكرومايت كحاجز بين الحراريات الحامضية والقاعدية لمنع التفاعل المتبادل بينهما.

2- حراريات الكروم- مغنسايت (Chrome-Magnesite):

ينتج هذا النوع من الحراريات عند إضافة كاربونات المغنيسيوم إلى خام الكروم، وتعتمد نوعية المنتج على نسبة الكروم المضافة لذا يجب التمييز بين حراريات الـ (chrome-magnesite) وحراريات الـ (magnsite-chromite)، إذ تحتوي حراريت الكروم - مغنسايت على($15Cr_2O_3$ – 30%) و (42MgO – 50%) بينما في حراريات المغنسايت - كرومايت هناك على الأقل (60MgO%) و (– 18 % $8Cr_2O_3$) و كلا النوعين يستعمل في أفران صناعة الفولاذ.

3- حراريات الزركونيا (Zirconia Refractories):

يوجد أوكسيد الزركونيوم أو الزركونيا (ZrO_2) في الطبيعة على نطاق ضيق ولكن يمكن الحصول عليه عادة من مادة سليكات الزركونيوم (الزركون Zircon) ($ZrSiO_4$). يعد الزركونيا عازلاً حرارياً جيداً ، يستعمل لصنع البوادق المقاومة للحرارة لأنه لا يبتل بالعديد من المعادن المنصهرة ويكون هذا الأوكسيد أكثر استقراراً عند إضافة الجير.

4- كاربيد السليكون (Silicon carbide):

ينتج كاربيد السليكون SiC بتسخين رمل السليكا وفحم الكروك معاً، كاربيد السليكون مادة حرارية صلبة جداً ذات قدرة تحمل ميكانيكية جيدة في درجات الحرارة العالية ومستقرة كيميائياً ونظراً لصلابتها العالية فإنها تستعمل لأغراض التنعيم ولكونها موصلاً جيداً للحرارة

فقد اصبحت ملائمة للاستخدام في الأفران والقضبان الحرارية كما تستعمل في صناعة أقطاب التسخين للأفران الكهربائية.

5- حراريات الكرافيت (Graphite):

يوجد الكرافيت في الطبيعة على شكل كاربون رخو ولكنه مقاوم جيد للحرارة ويقاوم بشدة التفاعلات الكيميائية كما يبدي ميلاً للتأكسد في درجات الحرارة العالية مكوناً ثنائي أوكسيد الكاربون، وهو موصل جيد للكهربائية وتمدده الحراري قليل ويمتاز بازدياد متانته بازدياد درجات الحرارة، يستعمل في العديد من الاستعمالات منها صنع البوادق، كما أن خصائصه الكهربائية تجعله ملائماً لإنتاج الأقطاب والفرشاة المستعملة في المحركات الكهربائية.

4- الحراريات النفاذة (Permeable Refractories):

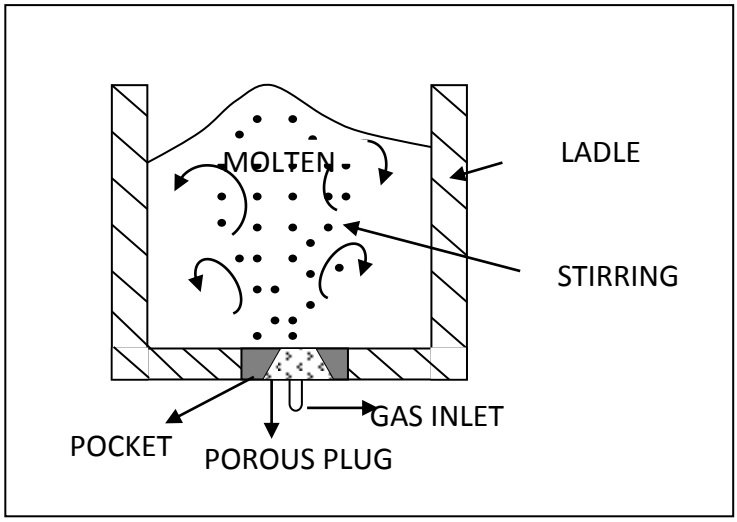
هي المواد التي تتكون بداخلها مسامات تسمح بمرور الموائع عبرها وتكون هذه المسامات أما منفصلة أو متصلة إذ تدخل عوامل عديدة في عملية التصنيع تحدد سعة المسامات وعددها وطبيعتها، وتستعمل مثل هذه الحراريات بتقنيات معاملة الغاز مع مصهور المعدن، إذ يدخل الغاز عن طريق سداد (Plug) نفّاذ يثبت في أسفل المغرفة (ladle) المحتوية على الفولاذ أو الحديد المصهور، والشكل (6-7) يمثل مخططاً توضيحياً لهذا السداد المثبت في أسفل المغرفة ، فعندما يعمل السداد كناشر للغاز، يكوّن مسارات من فقاعات الغاز الناعمة في سائل المعدن ، فتؤدي الحركة التصاعدية لمسارات فقاعات الغاز الى امتزاج قوي لسائل المعدن محققة المميزات الاتية:

1. إزالة الغازات المحصورة في أصل المعدن.
2. إزالة المحتويات غير المعدنية.
3. تقليل زمن اتمام عملية الصهر.
4. حصول تجانسية المصهور بالنسبة لدرجة الحرارة والتركيب الكيميائي.
5. زيادة الطبقة السطحية الفاصلة بين المعدن والخبث (slag).
6. تقليل تكون الخبث أثناء التسخين.

7. تقليل التلف الحراري.

8. تعمل الفقاعات كعامل مساعد في اخضاع المعدن.

9. وصول النظام ككل إلى حالة التوازن بسرعة كبيرة.



شكل (6-7) مخطط توضيحي للسداد المثبت في أسفل المغرفة

إن عملية مزج الغاز مع مصهور المعدن في أثناء الصهر تتم باستعمال أنواع مختلفة من السدادات مثل السداد المسامي (Porous Plug) والسداد متعدد المداخل (Multi Hole Plug) والسداد مفرد الأنبوب (Single pipe plug). وتعد هذه التقنية الآن أكثر انتشاراً من الماضي إذ استعملت أولاً منذ أربعين سنة تقريباً في تقنيات تنقية الفولاذ فقط أما الآن فتستعمل في صناعة الألمنيوم والنحاس فضلاً عن الحديد والفولاذ.

وعلى الرغم من انتشار هذه التقنية في مختلف أرجاء العالم إلا أن الخلل الناتج من عمليات تركيب السدادة وكذلك فقر نوعية الحراريات المصنعة بما يخدم هذه التقنية أدى إلى ازدياد البحث في هذا المجال لجعل هذه التقنية ممتازة اقتصادياً، إذ أن السدادات النفاذة يجب أن تمتلك على الأقل نفس عمر بطانة المغرفة ladle linning أي (15 إلى 20) تشغيلة لتطبيقات الفولاذ وحوالي 50 تشغيلة لتطبيقات الحديد، وكانت السدّادات المصنعة في السبعينات من القرن الماضي تدوم لـ 4 أو 5 تشغيلات فقط.

ان حراريات الالومينا النفاذة المستعملة في مغرفة صهر الفولاذ والحديد يجب أن تمتلك نفاذية عالية لدخول كميات كافية من الغاز إلى المغرفة، كما إن حجم المسامات يجب أن يكون صغيراً بما فيه الكفاية لمنع تسرب سائل المعدن إلى داخل المسامات، و القطعة الحرارية يجب أن تكون قوية بما فيه الكفاية لمقاومة الاجهادات والتآكل على الأقل بعمر البطانة نفسه.

تستعمل الحراريات النفاذة ذات الحجوم الحبيبية الناعمة عندما تثبت في أسفل مغرفة الصهر في إزالة الكبريت من الحديد اللدن، وفي هذه العملية يضاف كاربيد الكالسيوم (Calcium carbide) إلى الحديد المصهور بينما يحرك المعدن بوساطة غاز النتروجين الذي يضخ خلال السداد المسامي، عندها سوف يتفاعل CaC_2 مع الكبريت الموجود في الحديد ليشكل CaS وكاربون حر وCaO، كل من CaS وCaO تذوب في الخبث بينما يذوب الكاربون الحر في الحديد. هذه العملية تحصل خلال (2 – 5) دقيقة.

ومن الاستعمالات الأخرى للحراريات النفاذة هي القلوب الرملية (Sand cores) إذ تستعمل هذه التقنية في مجال واسع في أغلب أنواع عمليات صب المعادن، فوجود القلب الرملي يسمح بحصول أشكال معقدة ورقيقة للصب، لذلك تعتبر نوعية القلب الرملي المحور الأساسي في الصناعات المعدنية الحديثة، يغطى هذا القلب عادة بطلاء حراري ليمنع اختراق القالب من قبل المعدن المنصهر وكذلك يتحمل التشوه أثناء التسخين كما يعطي للمعدن المصبوب صفة النعومة.

هذا الطلاء يكون عادة مزيجاً من مواد حرارية، روابط، سوائل حاملة (ماء أو كحول)، سليكا، الومينا، زركون، كرومايت، الومينا - سيلكات مثل الميولايت، وكذلك البيروفيلايت كمركبات حرارية . بعض الروابط تزيد قوى التماسك والتلاصق قبل التجفيف، أما التقوية فتحصل بعد التجفيف وفي أثناء صب المعدن، بعد التجفيف يجب أن تمتلك طبقة الطلاء نفاذية كافية لتهرب الغازات المتكونة.

إن سمك هذا الطلاء ما بين (0.25 – 0.80 mm) ، عند تصنيع هذا القلب الرملي تكون مادة الطلاء على شكل سائل أما القلب الرملي فما هو إلا مادة مسامية إذ تغمر هذه المادة المسامية في سائل الطلاء، إن المواد المكونة لسائل الطلاء سوف تتسرب إلى مسامات القلب الرملي وتحصل عملية التغطية (Coating).

(6-6) تطبيقات الحراريات

لضمان الحماية من الحرارة (Service condition of heat) والتآكل الجوي (Corrosion atmospheres) وتآكل الجريان الحاملة للجسيمات المحتكة ، يتطلب استخدام الحراريات وفي مختلف الاماكن . لذلك فاستخدام الحراريات هي خطوة متميزة في تحسين البطانات الحرارية ، اذ ان اقدم التصاميم في اغلب الاحيان تستخدم عوازل حرارية من الحراريات الخفيفة الوزن ، غالبا ما تقام شبكات فولاذية سداسية لمقاومة التأثير الفيزيائي لجريان الغازات عالية السرعة والحرارة العالية . اما التصاميم الحالية للحراريات فتستخدم في مناطق واسعة وهي طبقة واحدة من العوازل الحرارية التي تمتاز بقوة خواصها الفيزياوية(Strength properties) وخفة وزنها (light wight) وكثافة المنتج (dense production) واذا فالتركيب الحراري يعتمد على التصميم (design) والمواد الرابطة (anchorage) ونوع المواد ومهارة التصنيع والقولبة وفي هذا الجزء سوف نوضح ابرز الاستخدامات للحراريات وهي :-

1 - استخدام الحراريات في الصناعات الحديدية والفولاذية:

(Use of refractory in the iron and steel industry)

ان انتاج الحديد والفولاذ يستهلك حوالي 70% من المجموع الكلي لصناعة الحراريات .

2- استخدام أفران الصهر في الصناعات الحديدية:

(Use of the blast furnace- iron making)

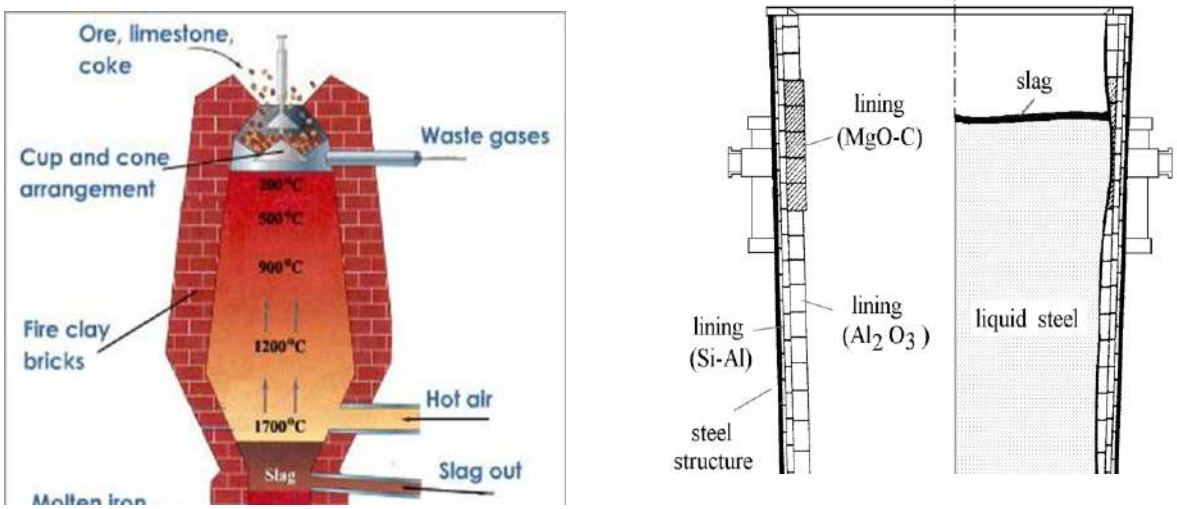
على الرغم من المنافسة المستقبلية باتجاه تقليل عمليات انتاج افران الصهر ولكنه يبقى ولعدة سنين النوع الرئيس من الافران لإنتاج الحديد (لصناعة الحديد) . اذ انه وفي الوقت الحالي باتجاه تشييد (بناء) اكبر افران تستخدم درجات حرارية عالية وزيادة في كمية الاوكسجين للصهر وقمة في الضغط ، كل هذه الشروط هي اسباب رئيسة حرجة في بناء الحراريات من هذا النوع .

ان فرن الصهر يكون من اسطوانات فولاذية مستدقة ممتدة مع المعدن الحراري المنتج بمختلف الاشكال . ويتم تغذية الفرن من الأعلى الذي ربما يكون طوله حوالي (36 m) .

3- أستخدام الحراريات في أفران صهر صناعة الفولاذ:

(Use of refractory in the blast furnaces – steel making)

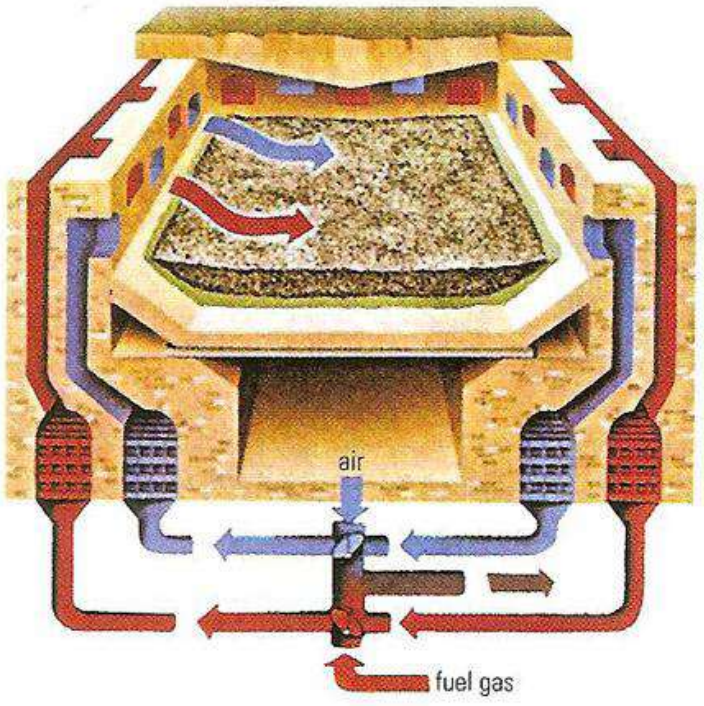
الفولاذ يصنع بواسطة تكرير (refining) وقولبة (modifying) الحديد المنتج في أفران الصهر الحديدية الموصوفة اعلاه . فهناك اعداد كبيرة من مختلف أنواع أفران الصهر التي تعتمد في عملها على أساس ومبادئ الكيمياء الفيزياوية (Physicochemical principle) في صناعة الفولاذ شكل (6-8).



شكل (6-8) افران صهر صناعة الفولاذ

4- أفران المواقد المفتوحة (Use of refractory in the open – hearth furnaces)

هناك نوعان رئيسيان من افران المواقد المفتوحة 1- الثابتة Fixed 2- المزودة بغطاء Tilting . الافران الثابتة هي الغالبة وتستخدم عادة الحرارة مع الغاز او الزيت شكل (6-9) . اما النوع الاخر المزود بغطاء فيصنع لأجل عمل المواقد التي تميل او تنحدر (Inclined) بـ (15– 35) درجة



شكل (6-9) افران الموقد المفتوحة

5-استخدام الحراريات في الافران الفولاذية الكهربائية: (Use of Refractory in electric steel furnaces)

الأفران التي يكون فيها مصدر الحرارة لصهر الفولاذ كهربائيا هي نوعان رئيسيان:-

- الأقواس الكهربائية (Electric – arc) هي التي يكون فيها القوس مغلقا (struck) بين اقطاب الكرافيت – حراريات الكاربون المتجانسة .
- الأفران الحثية (Induction furnaces) وهي التي يمر فيها التيار المتناوب خلال الملفات المحيطة بالبودقة (Crucibles) المحتوية على شحنات الصهر فالتيارات المحتثة في المعدن المشحون سوف تنتج حرارة كافية لانصهار المعدن .

6- استخدام الحراريات في الصناعات الخالية من الحديد: (Use of Refractory in non – ferrous metals making)

اقل من 10 % من كل انتاج الحراريات في العالم مستخدم في إنتاج أفران مواد خالية من الحديد مثل النحاس ، النيكل ،الزنك والقصدير والرصاص والألمنيوم والمغنسيوم ومركبات أخرى. إن

استعمال الحراريات للانصهار والتكرير لهذه العناصر حرج جدا . لذا فتطور الافران الجديدة وتقنيات الانصهار هي مسميات جديدة في تطور تقنية الحراريات .

7-أستخدام الحراريات في الأفران الأسمنتية: (Use of refractory in cement furnaces)

الحراريات المستخدمة في هذه الأفران تكون انبوبية الشكل (tubeler) أبعادها حوالي 6 فوت قطريا و 500 فوت طوليا ، والمواد الاولية في تكوين هذه الافران تميل الى ان تكون معادن طينية (clay – minerals) ومعادن كلسية (lime – minerals) التي اما تخرج طينية القوام (slurry) او جافة (dry) والتي تغذى من احد نهايتي الفرن الدائري . اما الوقود مثل مسحوق الفحم (powder coal) أو الزيت أو الغاز فيحرق من النهاية الاخرى للفرن لذلك فالغازات الحارة تتحرك باتجاه معاكس للمواد الاولية . والفرن يكون منحدرا قليلا باتجاه افقي .

8-أستخدام الحراريات في صناعة الفرن السيراميكي: (Use of refractory in ceramic kilns)

لكي نبني الفرن السيراميكي يتم تحويل المواد الاولية الى معادن سيراميكية التي تقوم بشكل اساسي على التفاعلات الكيمياء الفيزيائية المعقدة (complex physicochemistry reaction) التي تحدث خلال عملية التسخين.

9-أستخدام الحراريات في العمليات التكريرية والبتروكيميائية : (Use of refractory in refining & petrochemical operation)

وحدات التكرير والوحدات البتروكيميائية في اماكن متنوعة تعمل بدرجات حرارية تتراوح بين (1300 -3250 °C) فوحدات الموائع المحفزة للكسر (fluid cataluticcracking unit) ووحدات الامونيا ووحدات تكرير النفط (naphtha reforms) يجب ان تحتوي على بطانات مناسبة لحماية الانابيب وجدران الافران من العمليات التي تحتوي حرارة والتأكل والصدأ . لذلك فهذه الوحدات يجب ان تستخدم معادن الحراريات .

اسئلة الفصل السادس

1- إذا علمت أن بعض سبائك المعادن لها درجة انصهار عالية هل يمكن استعمالها مواداً حرارية ولماذا؟

2- عدد خمسة تطبيقات شائعة للحراريات واذكر واحدة من المواد الحرارية المستعملة لكل تطبيق.

3- يراد تصنيع بطانة فرن لصهر النحاس وأخرى لصهر الحديد فإذا علمت أن خبث منصهر النحاس حامضي وخبث منصهر الحديد قاعدي ، اقترح مادتين حراريتين لتصنيع كل نوع من البطانة.

4- اذكر ثلاث أشكال للمنتجات الحرارية المستخدمة في صناعة الأفران.

5- كيف يمكن تقليل التصاق المعادن ببطانة الأفران او بوادق الصهر؟

6- عرف الكروك وما هي فائدة إضافته إلى حراريات الأطيان.

7- اعط تصنيفاً للحراريات المؤلفة من الالومينا : واطئة الالومينا، متوسطة الالومينا، عالية الالومينا مع ذكر تطبيق لكل منهم.

8- اكتب الصيغة الكيميائية للمواد الحرارية التالية مع ذكر اثنين من التطبيقات الحرارية وابرز صفاتها:

1- كاربيد السيليكون 2- حراريات الدولومايت 3- حراريات السيليمنايت.

9- اذكر الصيغة الكيميائية للمواد الحرارية التالية وصنفها تبعاً للطبيعة الكيميائية واذكر واحدة من ابرز تطبيقاتها:

1- الكورندم 2- المغنسايت 3-المولايت.

10 –اجب بكلمة صح او خطأ ثم صحح الخطأ .

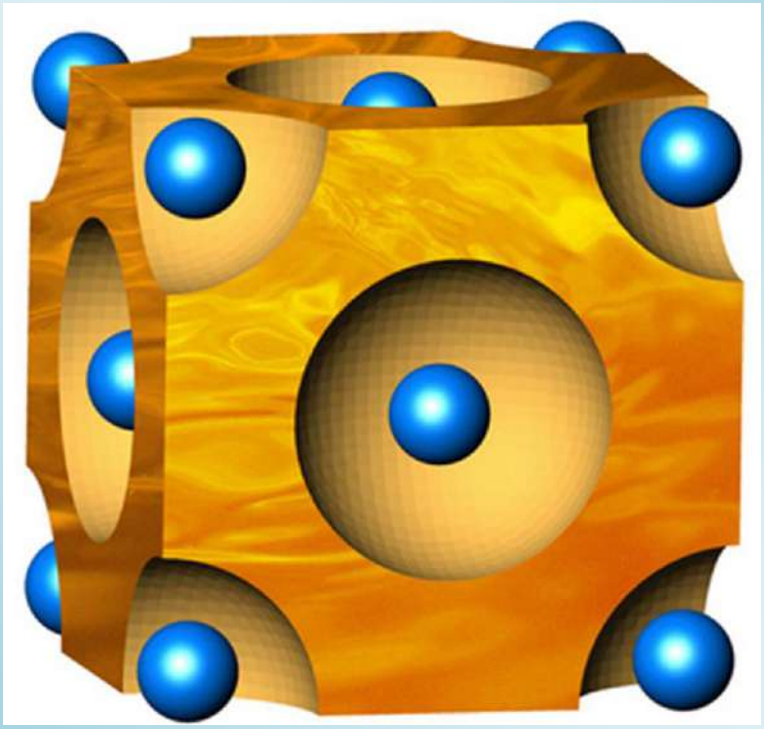
1- المقاومة الحرارية : هي قدرة المادة على الصمود امام الحرارة دون حدوث أي تشوه تحت ضروف التشغيل .

2- يوجد الكرافيت في الطبيعة على شكل كاربون صلد ولكنه غير مقاوم للحرارة .

3- يدخل الطين الناري في جميع انواع الحراريات الحامضية – والمتعادلة والقاعدية .

الفصـــــــــــل السابع

خواص المواد السيراميكية



أهداف الفصل السابع :

من المتوقع أن يتعرف الطالب على :

1- الخواص الفيزيائية والحرارية والميكانيكية للمنتجات الخزفية.

2 - المعادلات الرياضية الخاصة بالخصائص.

3- العوامل المؤثرة فى الخصائص.

محتويات الفصل السابع

(1-7) الخواص الفيزياوية

(1-1-7) التوزيع الحجمي للحبيبات

(2-1-7) المسامية

(3-1-7) الكثافة

(4-1-7) إمتصاصية الماء

(2-7) الخواص الميكانيكية

(1-2-7) الكسر

(2-2-7) مقاومة الكسر

(3-2-7) مقاومة الشد

(4-2-7) مقاومة الأنضغاط

(5-2-7) مقاومة الأنحناء

(6-2-7) مقاومة الشد الأنفلاقي

(3-7) الخصائص الحرارية

(1-3-7) التوصيلية الحرارية

(2-3-7) مقاومة الصدمة الحرارية

(4-7) العوازل الكهربائية

(1-4-7) تصنيف المواد العازلة

(2-4-7) الأستقطاب

(3-4-7) سعة العازل

(4-4-7) سماحية العازل

(5-4-7) زاوية الفقد

(6-4-7) عامل الفقد

(7-4-7) متانة العازل

الفصـــــل السابع

(1-7) الخواص الفيزياوية Physical Properties

لكي نحصل على أفضل المواد السيراميكية يجب أن نحقق مواصفات فيزياوية عدة ، لاستخدام هذه المواد في تطبيقات محددة عمليا ، وأهم هذه الخواص هي :

(1-1-7) التقلص الناتج من الحرقBurning Shrinkage

عند حرق الأجسام الطينية ستعاني تقلصاً إضافياً يعرف بتقلص الحرق ويشبه تقلص الجفاف من حيث التنوع ما بين حدود واسعة ويعتمد على العديد من العوامل مثل:

1- نوع الطين الموجود.

2- درجة نعومة الطين.

3- كمية المواد العضوية في الطين.

4- طريقة تصنيع الجسم.

5- درجة حرارة الحرق.

بصورة عامة الأطيان اللدنة تمتلك تقلصاً أكبر من الأطيان غير اللدنة في كل من التجفيف والحرق. كذلك وجود المواد العضوية في الأطيان يرافق زيادة تقلص الحرق. إن تقلص الأطيان يزداد عند ازدياد درجة الحرارة ضمن حدود معينة. عند زيادة درجة الحرارة سوف يحدث الانصهار والتفكك إذ تتنوع الأطيان بشكل واسع في سلوكها عند الحرق. أكبر تقلص حرق يحصل لأطيان عند درجة

حرارة واطنة بالمقارنة بالأطيان الأخرى التي تتطلب حرارة أكثر ارتفاعا قد ينضح نوع من الطين عند درجة حرارة عالية يكون له تقلص واطئ بالنسبة لنوع آخر ينضح عند درجة حرارة واطئة.

تقلص الحرق هو خاصية مهمة للأطيان إذ بزيادته يحدث تشويه والتواء وتشققات في الجسم، على أية حال، من المهم ملاحظة تقلص الحرق من أجل السيطرة على حجم المنتج النهائي ليس عند استعمال الأطيان فقط ولكن عند استعمال الأجسام الحاوية على الطين. إن حساب تقلص الحرق (النسبة المئوية لتقلص الحرق) يكون على أساس الحجم الجاف والطول الجاف وبحسب الصيغة:

$$\text{نسبة (تقلص الحرق الخطي)} = \frac{\text{طول النموذج بعد التجفيف – طول النموذج بعد الحرق}}{\text{طول النموذج بعد التجفيف}} \times 100$$

$$\text{نسبة (تقلص الحرق الحجمي)} = \frac{\text{حجم النموذج بعد التجفيف – حجم النموذج بعد الحرق}}{\text{حجم النموذج بعد التجفيف}} \times 100$$

$$\text{نسبة (تقلص الحرق الخطي)} = 1 - \left(\sqrt[3]{1 - \frac{\text{نسبة تقلص الحرق الحجمي}}{100}}\right) \times 100$$

إن سلوك الطين عند الحرق يتضمن تغيرات كبيرة في المسامية والحجم واللون والمتانة والامتصاص والمتانة الميكانيكية والجاذبية النوعية الحقيقية والظاهرية. كمية تقلص الحرق الناتج تعتمد على كل من الزمن ودرجة الحرارة إذ [الزمن الأطول عند درجة حرارة واطئة يكافئ الزمن الأقصر عند درجة حرارة مرتفعة] كمية التقلص كذلك تتغير مع المسامية الأولية. إن حدوث تقلص غير متساوٍ للجسم السيراميكي خلال الحرق يمكن أن يعزى إلى عدة أسباب منها:

1- التوزيع غير المتساوي للحرارة داخل المنتج.

2- زمن بقاء المادة عند درجة حرارة التلبيد يتنوع بشكل ملحوظ من نقطة إلى نقطة أخرى هذا يعني (المقطع الأسمك يختلف عن المقطع الأخف).

3- هنالك دقائق تنفصل خلال التشكيل مسببة اختلافاً في حجم الدقائق أو عدم التركيب.

4- تقلص عدم التماثل (عدم تشابه الخواص في جميع الاتجاهات) نتيجة اختلاف توجيه الدقائق.

5- انسياب يحدث بسبب الإجهادات التي تسببها الجاذبية خلال فترة ارتفاع الحرارة عند الحرق.

6- هنالك احتكاك بين قاعدة الفرن والقطعة المتقلصة.

الاهتمام والدقة في طريقة التشكيل والتجفيف والحرق يمكن أن تجنب التغير في الأبعاد. أحيانا هنالك تمدد بالحجم خلال الحرق. واحدة من هذه الحالتين تسهم في ذلك التمدد:

أ- التغير بالطور من الطور الأكثف إلى الطور الأقل كثافة.

ب- الغازات التي تنشا بعد التزجج الأولي.

وفي النهاية سيحدث الانتفاخ .

(2-1-7) التوزيع الحجمي للحبيبات (Particle Size Distribution)

يعد الحجم الحبيبي للمواد الأولية المستعملة في الصناعات الحراريات من العوامل المهمة لتأثيره على خواص المنتج النهائي. فللحجم الحبيبي دور كبير في عملية التكثيف والتلبيد يتناسب معها تناسباً عكسياً، كما إنه يتحكم بعملية التحول إلى المولايت في أثناء عملية التلبيد.

إن التفاعلات في أثناء عملية التلبيد تتناسب طردياً مع المساحة السطحية للحبيبيات فكلما كانت الحبيبة بحجم حبيبي أصغر كلما كانت المساحة السطحية كبيرة ومن ثم تزيد من عملية الاندماج والتلبيد وتؤدي إلى زيادة معدلات التحولات الطورية مسببة انخفاض المدة اللازمة للإنضاج.

ولحجم الحبيبة تأثير في المسامية وعمليات التمدد الحجمي والخطي وكذلك التقلصات وامتصاصية الماء وكذلك يؤثر في معامل المرونة للمنتج النهائي .

(2-1-7) المسامية Porositv

تعرف المسامات بأنها فراغات ولها قياس وشكل وترتيب معين اعتمادا على الكثير من الظروف، وغالبا مايكون هنالك اتصال أو تشابك بين الاكثرية منها كما موضح في الشكل (1) ، تُحددّ المسامية خواص أخرى في الأجسام الصلبة كمقاومة الخبث (slag resistance) ومقاومة التقشر (spalling)، إذ تعد المسامية وقوة الشد الميكانيكي في الأجسام الصلبة بصورة عامة وفي الحراريات بصورة خاصة عوامل سيطرة نوعية من خلالها يمكن التحكم بباقي خواص العينات المنتجة. تعرّف المسامية على أنها النسبة بين حجم فراغ الهواء المحصور بين جسيمات المادة (void space) إلى حجم كتلتها.

هناك نوعان من المسامات، المسامات المفتوحة (open pores)، والمسامات المسدودة (sealed or closed pores)، وتقسم الأخيرة إلى نوعين: (i) المسامات المسدودة في الأصل، (ii) المسامات المفتوحة في الأصل ولكن سُدّت بالمواد المصهورة المتشكلة في أثناء الحرق ، وبالإمكان منع حدوث سد المسامات المفتوحة بوساطة التسخين البطيء.

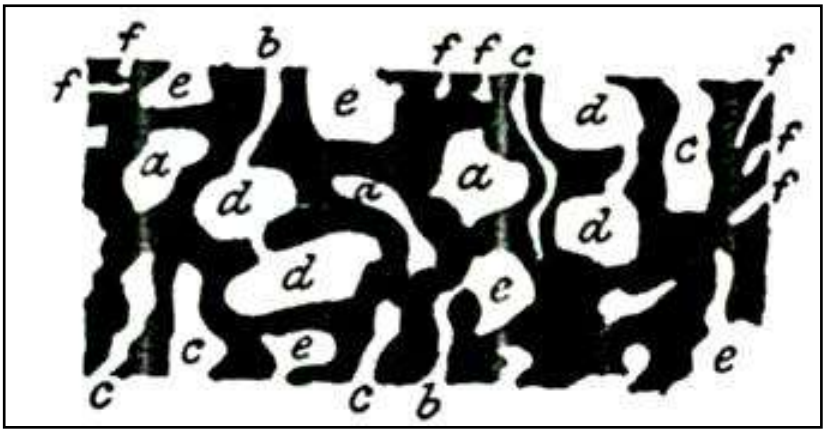
المسامات المفتوحة هي المسامات التي تكون ظاهرة على الأقل على سطح واحد من أوجه العينة، وتنتج من (i) الفراغات الناتجة عن طرائق رص الحبيبات المفردة (ii) هروب الماء خلال التجفيف أو الغاز خلال الحرق، (iii) التشققات المجهرية التي تتكون في أثناء التجفيف أو الحرق كنتيجة للتقلص والتمدد. وحسب تصنيف (واشبرن) (Washburn, 1921) فإن هناك ستة أنواع من المسامات:

1- المسامات المغلقة أو المحكمة (Closed or Sealed).
2- المسامات القنواتية المتصلة بالمسامات المعزولة (Channel pores connecting separate pores).
3- المسامات غير النافذة (Blind-Alley pores).
4- المسامات العقدية (Loop pores)

5- المسامات الحبيبية أو التجويفية المرتبطة ببعضها البعض برقاب ضيقة Pocket pores (some with narrow necks).

6- المسامات الدقيقة (Micro pores) التي تكون صغيرة جداً لا تملأ بالماء أو أي سائل في أي حالة.

وهنالك نوع آخر من المسامات يسمى المسامات المستمرة (continuous)التي تمتد بمسار معقد بأحد الأوجه الخارجية للجسم وإلى الوجه الآخر. يمكن توضيح أنواع المسامات بالشكل (7-1):



شكل (7-1) الرسم التوضيحي لأنواع المسامات

إن وجود هذه الأنواع المختلفة من المسامات في المواد يتطلب تعريف مفهومين لمسامية المادة هي:

1- المسامية الحقيقية (True porosity): وهي النسبة بين الحجم الكلي للفجوات لكلا نوعي المسامات المفتوحة والمغلقة إلى حجم المادة.

2- المسامية الظاهرية Apparent porosity: ويمكن تعريفها على أنها النسبة بين حجم الماء أو السائل الممتص من قبل المادة إلى الحجم الكلي للمادة، أوهي المسامات المتصلة بالسطح أو المسامات المفتوحة ، ويقصد بالمسامية الظاهرية نسبة احتواء الجسم السيراميكي من المسامات المفتوحة إلى الحجم الكلي. وغالباً ما ترافق المسامية الظاهرية كمية امتصاص الماء وذلك لان كمية الماء الممتص تمثل حجم المسامات المفتوحة التي يملؤها الماء . تعتمد هاتان الخاصيتان على عاملين هامين يتأثران بهما تأثيرا مباشرا هما عمليات التلبيد وعملية تكون المسالك والفجوات بسبب

الغازات المتحررة ، ويؤثر بهذين العاملين درجة حرارة الحرق والمكونات الكيميائية والمعدنية للمادة السيراميكية. إن الجسم السيراميكي قبل عملية الحرق يكون ذا مسامية عالية وان أغلبيتها تكون على شكل مسامات مفتوحة، ولكن في المراحل الأولى من عملية الحرق يختزل قسم منها ويتحول إلى مسامات مغلفة وبهذا تزداد النسبة المئوية للمسامات المغلقة إلا أنها سرعان ما تقل مع تقدم عملية التلبيد.

ومن أكثر الطرق شيوعاً لوصف المسامية هي المسامية الظاهرية (Apparent Porosity) التي يقصد بها نسبة احتواء الجسم السيراميكي من المسامات المفتوحة إلى الحجم الكلي للجسم السيراميكي، وغالبا ما ترافق امتصاص كمية من الماء وذلك لان كمية الماء الممتص تمثل حجم المسامات المفتوحة التي يملؤها الماء.

وهنالك مفهوم آخر للمسامية يعرف بالمسامية الحقيقية (True Porosity) وهي النسبة بين الحجم الكلي للفجوات لنوعي المسامات المفتوحة والمغلقة إلى حجم المادة الكلي ، ويمكن تحديد المسامية باستعمال العلاقات التالية:

إذ: W_s يمثل وزن النموذج مشبع بالماء (gm)، W_d يمثل وزن النموذج جاف (gm)،

W_i يمثل وزن النموذج مغموراً بالماء (gm)، ρ تمثل الكثافة الوزن النوعي الظاهري(gm/cm^3)، (S.G.) تمثل الوزن النوعي الحقيقي (gm/cm^3).

هناك عدة عوامل تؤثر في المسامية هي:

1- المقاس الحبيبي وشكل الحبيبات.

2- التدرج الحبيبي وطريقة التشكيل.

3- ضغط التشكيل وكمية المادة الرابطة.

4- درجة حرارة الحرق وزمن الإنضاج.

يمكن تقسيم المسامات حسب الحجم في الجدول الآتي:

ومن الجدير بالذكر أن معظم المسامات الموجودة قبل الحرق تكون على شكل مسامات مفتوحة، أما بعد الحرق فأن الكسر الحجمي للمسامية (نسبة حجم المسامات إلى حجم المادة) يقل، إذ أن بعض

المسامات المفتوحة تزال مباشرة والبعض الآخر يتحول إلى مسامات مغلقة، نتيجة ذلك فإن الكسر الحجمي للمسامات المغلقة يزداد ابتدائياً ولكن يقل باتجاه نهاية عملية الحرق (زيادة درجات الحرارة).

إن المسامية وللمواد المختلفة تتأثر بالعوامل التالية:

1- شكل الحبيباتShape of the particles.

2- حجم الحبيبات Size of particles.

3- تدرج الحبيبات Grading of the particles.

4- طبيعة المادة المؤلفة للنسيج Natural of the materials comprising the mixture.

5 - المعاملة للمادة المستعملة خلال التصنيع Manufacture.

6- الموقع النسبي للحبيباتRelative position. أي مواقع الحبيبات المكبوسة أو المسافة فيما بينها.

إن أي مادة تشكل من مواد أولية مخلوطة بهيئة مسحوق ذات تدرج حجمي معين تكون حاوية على الفجوات ، إذ عملياً لا يمكن إنتاج جسم خالٍ من الفجوات، إلا انه يمكن تقليل عدد المسامات

Pore	Width
Macropores	d > 50 nm
Mesopores	50 nm > d > 2 nm
Micropores	d < 2 nm
Ultramicropores	d < typical molecule diameter of the adsorptive ≈ 0.6 nm
Classification of macropores	
Rough pores	d > 2 mm

Macrocapillaries	2 mm > d > 50 μm
Capillaries	50 μm >d > 2 μm
Micro capillaries	d < 2 μm

بالتدرج الدقيق كما يمكن تقليل المسامية للحبيبات بالكبس تحت ضغط عالٍ لأن زيادة ضغط التشكيل يقلل المسامية إذ تكون الجسيمات أكثر اقتراباً فتقل الفجوات الناتجة.

إنّ الخاصية الميكانيكية والمسامية تعدان من عوامل السيطرة النوعية على عمليات التصنيع لتقدير تأثير مختلف العوامل الناتجة في خواص المادة السيراميكية النهائية . هناك علاقة بين المسامية والخواص الميكانيكية للمادة السيراميكية فزيادة المسامية تؤدي إلى انخفاض قوة التحمل وتعد من العوامل التي تحدد التركيب الداخلي للمادة السيراميكية وبقائها . ومن هذه العوامل أيضا الكثافة الظاهرية ، المساحة السطحية للفجوات (المسامات) وأحجامها وتوزيعها وانتشارها في حجم الحراريات .

يكون عدد المسامات في المواد السيراميكية مختلفا من نوع إلى آخر وكذلك حجمها وشكلها، وقد بينت التجارب على الكاؤولين أن قيمة المسامية تقل بزيادة درجة حرارة الحرق الاكثر من (1000 °C) تقريباً ، وذلك بسبب قيام منصهرات بعض الشوائب والمواد المصهورة التي يحويها الطين ضمن تركيبه الكيميائي بملء الفراغات الموجودة بين حبيبات المولايت والكريستوبلايت ، إضافة إلى حدوث عملية تكون الطور الزجاجي فيصبح بناء النموذج السيراميكي أكثر صلابة ، أما في الدرجات الحرارية المنخفضة، فقد يحدث تزايد في المسامية بزيادة درجة حرارة الحرق ضمن المدى الذي يشمل خروج الماء من التركيب البلوري بسبب المسارات الشعرية المتكونة .

كما أن هناك خواص كثيرة تعتمد على شكل المسامات في الحراريات كما في المواد السيراميكية أهمها التوصيلية الحرارية وبعض الخواص الميكانيكية.

- **تأثير المسامية على تقلص الحرق Porosity Effects on Fired Shrink**

إذا احتوى الجسم السيراميكي المجفف على مسامية (مسامية حقيقية True Porosity) عالية و قد أُزيلت المسامية بشكل كامل خلال عملية الحرق فأن تقلص الحرق الناتج سيكون كبيراً.

تعتمد المسامية على توزيع الحجم الحبيبي للدقائق(Particle Size Distribution) وذلك من خلال أفضل رص للدقائق للحصول على جسم سيراميكي كثيف الرص و ذي مسامية منخفضة.

في الأنظمة المشتتة (Deflocculated Systems) تتطابق المسامية مع أوطأ قيمة محسوبة للمسامية الحقيقية، لهذا السبب تعديل توزيع الحجم الحبيبي يُنتِج أفضل رص للدقائق، المسامية ستقل وبالنتيجة تقلص الجفاف سيقل وتقلص الحرق سيقل أيضاً.أمّا الأنظمة المتكتلة (Flocculated Systems) أو المتكتلة بشكل جزئي(Partial-Flocculated) لا تعتمد على توزيع الحجم الحبيبي للدقائق في تقليل قيمة المسامية لذلك يتم السيطرة على المسامية في الحالات الرطبة والجافة (Green and Dry States) بوساطة تكتل النظام، ستكون المسامية عالية لذلك ستكون قيمة تقلص الجفاف وتقلص الحرق مرتفعة

(3-1-7) الكثافة (Density)

تعد الكثافة الحجمية من أهم خواص المنتجات السيراميكية وهي تحدد إمكانية استخدام هذه المنتجات في الصناعات المختلفة وهي أيضا تحدد خواص العزل الكهربائي في المواد.هناك عدة عوامل تؤثر في مقدار كثافة المواد السيراميكية مثل التركيب الكيمياوي ، التركيب البلوري ، الحجم الحبيبي ، والظروف التي ترافق عمليات التصنيع مثل طريقة التشكيل ، والضغط المسلط ، ودرجة حرارة الحرق .

أما العلاقة بين درجة حرارة الحرق والكثافة فهي علاقة طردية حيث تزداد بزيادة درجة حرارة الحرق وذلك لأن عدد المسامات ينخفض وتقل مسامية الجسم السيراميكي فتزداد بذلك الكثافة .

إنّ حجم الحبيبات يلعب دوراً مهماً في تحديد مقدار كثافة المادة السيراميكية حيث أن صغر حجم الحبيبات للنماذج قبل التشكيل يؤدي إلى تراص الحبيبات الطينية في أثناء الكبس وزيادة هذا

التراص في أثناء عملية التلبيد عند الحرق ، إلا أن تأثير درجة الحرارة العالية ($^{o}C1450$) يؤدي إلى رفع مقدار الكثافة في النماذج الخشنة ، وذلك لأن عملية التزجج وفعل الشوائب في الانصهار يقللان الفراغات ويزيدان الكثافة .

ولكن قد يحدث تناقص في الكثافة عند درجات حرارية مرتفعة للنماذج الطينية ذات الحجم الحبيبي القليل والنسب القليلة جدا من المواد الصهورة بسبب تكون أطوار منفصلة نتيجة انصهار حبيبات المادة السيراميكية .

من الممكن حساب الكثافة بالطرق التقليدية حيث تقاس أبعاد النموذج وكتلته وباستخدام العلاقة المبسطة نحصل على :

$$\text{الكثافة } (gm/cm^3) = \frac{\text{كتلة النموذج بعد الحرق (gm)}}{\text{حجم النموذج بعد الحرق}(cm^3)}$$

لكن هذه العلاقة غير دقيقة في وصف الكثافة لأسباب عدة منها عدم انتظام أبعاد النماذج بعد الحرق ، وكذلك وجود المسامات التي تشغل حيزا من حجم النموذج الكلي . إذاً وصف الكثافة مرتبط بالمسامية والمسامات أما مفتوحة وتمثل الفراغات التي من الممكن أن تملأ عند وضع النموذج في سائل ، أو مسامات مغلقة تكون على شكل فجوات داخل المادة والتي لا يمكن للسائل النفاذ خلالها ، فإذا كانت الكثافة معرفة على أنها : كتلة المادة / حجم الحبيبات للطين فقط (بدون مسامات مغلقة) فإنها كثافة حقيقة (True density). أما إذا عرفت الكثافة على أنها كتله المادة / الحجم الظاهري[حجم حبيبات الطين + حجم المسامات جميعاً (المفتوحة +المغلقة)] فإنها تسمى بالكثافة الظاهرية ويمكن حسابها باتباع قاعدة ارخميدس .

لقد دلّت الدراسات السابقة على أن قيم الكثافة الظاهرية تنخفض باستمرار عند رفع درجة الحرارة الى (^{o}C 950) ، وقد يعزى سبب ذلك الى تأثير تحرر الغازات وكذلك فأن حجم الفراغات سوف يكبر فتقل الكثافة ، إضافة الى التمدد الحاصل في أبعادها ، في حين رفع درجة حرارة حرق النماذج الى (^{o}C 1050) يؤدي إلى ارتفاع قيم الكثافة الظاهرية ، الذي يمكن أن يعود سببه إلى زيادة كمية نواتج عملية التلبيد من الأطوار البلورية والزجاجية مع انخفاض نسبة تحرر الغازات.

إن سبب استخدام التشكيل بالكبس مع الضغط العالي هو لزيادة التقارب في الحبيبات المكونة للنموذج المكبوس مع بعضها البعض بفعل قوة ضغط مكبس التشكيل الذي يودي إلى زيادة كمية كتلة الحبيبات المرصوصة في وحدة حجم النموذج وهو العامل الذي يعود إليه سبب ارتفاع كثافة النماذج ، وهذا لا يعني الحصول على كثافة تامة للمواد السيراميكية (بدون مسامات). كذلك تقارب الحبيبات للنماذج المكبوسة يودي إلى زيادة تكون الأطوار الزجاجية والبلورية التي تزيد من كثافة النماذج بعد الحرق . لهذا فمن الضروري إجراء عمليات الطحن الجيد لنماذج الكاؤولين وتنعيمها بواسطة الطاحونة ذات الكرات .

فإذا علمنا أن (Va) يمثل الحجم الظاهري وان (m_1) يمثل وزن النموذج في الهواء فإن الكثافة الظاهرية تعطى بالعلاقة :

$$(\text{gm / cm}^3)(\text{A.d}) = \frac{m_1}{V_a} = \frac{m_1}{V_s + V_{v_0} + V_{V_s}}$$

حيث :

(A.d) : الكثافة الظاهرية

(V_s) : حجم حبيبات الطين.

(V_{V0}) : حجم المسامات المفتوحة .

(V_{Vs}) : حجم المسامات المغلقة .

ويمكن إيجاد حاصل الجمع هذا باستخدام التغطيس بالزئبق أو بإتباع قاعدة ارخميدس .

1- الكثافة الحقيقية True density وتشير فقط للمادة الصلبة في الجسم من دون وجود أية مسامة إذ هي نسبة الكتلة إلى حجم المادة الحقيقي المتضمن حجم الجسم الصلب فقط .

2- الكثافة الظاهرية Apparent density وهي نسبة الكتلة إلى حجم الجسم الظاهري للمادة (الذي يمثل الجزء الصلب + المسامات المغلقة) .

3-الكثافة الظاهرية – الصلب وتعبر عن نسبة الكتلة إلى الحجم الظاهري – الصلب والذي يمثل (الجزء الصلب + المسامات المفتوحة + المسامات المغلقة) .

(4-1-7) إمتصاصية الماء Water Absorption

تعرف امتصاصية الماء بأنها كمية أو وزن الماء الممتص من قبل المادة بدرجة حرارية (100 ^{o}C)، ويعبر عنها بالنسبة المئوية لوزن المادة في الحالة الجافة ، وتحدد امتصاصية الماء نوع المنتج فإذا كانت امتصاصية الماء للمنتج أقل من (1 %) فهو منتج مزجج (Vitreous) أما إذا كانت أعلى من (1 %) فهو منتج مسامي (Porous)، وتعتمد الامتصاصية على مقدار المسامية حيث تتناسب معها تناسباً طرديا.

ولحساب كل من الكثافة والمسامية وامتصاصية الماء للحراريات كما للمواد السيراميكية نطبق طريقة أرخميدس حيث يوضع النموذج داخل ماء مغلي ولمدة (1hr) ومن ثم يترك مغموراً بالماء لمدة [24hr] بعدها يسجل وزن النموذج وهو معلق داخل الماء ومن ثم يخرج النموذج ويمسح بقطعة قماش ويسجل وزنه مرة أخرى ولهذين الوزنين ووزن النموذج وهو جاف ارتباط بعلاقات رياضية لإيجاد قيم الكثافة وامتصاصية الماء وهذه العلاقات هي .

$$B.D = Wd / (W_s - W_i)$$

$$A.D = Wd / (W_d - W_i)$$

$$A.P\% = [(W_s - W_d) / (W_s - W_i)] \times 100\%$$

$$W.A\% = [(W_s - W_d) / W_d] \times 100\%$$

إذ إنّ Wd= وزن العينة وهي جافة gm.

W_s= وزن العينة وهي مشبعة بالماء gm.

W_i= وزن العينة وهي مغمورة ومعلقة بالماء gm.

B.D= الكثافة الحجمية gm/cm^3.

A.D= الكثافة الظاهرية gm/cm^3.

A.P= المسامية الظاهرية %.

W.A= امتصاصية الماء %.

أما بالنسبة للكثافة الحقيقية فتحسب من وضع العينة في خلية قياسية معلومة الحجم ملحقة مع جهاز قياس الكثافة الحقيقية وتوضع الخلية في حجرة صغيرة وتغلق بإحكام، ومن ثم يتم تصغير الشاشة الدقيقة وإدخال حجم معين من الغاز المذكور إلى الغرفة القياسية عند ضغط مقداره (P_1) يحدد من خلال الشاشة الرقمية، ويحول الغاز إلى الحجرة التي تحتوي على النموذج وملاحظة التغير الحاصل في الضغط (P_2) وتستعمل العلاقة الآتية .

$$V_p = V_c - V_R[(P_1 / P_2) - 1]$$

حيث إنّ:-

V_p= الحجم الحقيقي للنموذج cm^3.

V_c= حجم الخلية القياسي ($12.57cm^3$).

V_R= حجم المصدر القياسي ($5.4cm^3$).

P_1, P_2= ضغط غاز الهيليوم (mbar).

يتم حساب الكثافة الحقيقية بتطبيق العلاقة.

$$T.D(P_{sample}) = M_{sample} / V_p$$

إذ إنّ:-

T.D= الكثافة الحقيقية للنموذج gm/cm^3.

M= وزن النموذج بالـ gm .

(2-7) الخواص الميكانيكية Mechanical properties

تتعرض المادة السيراميكية - بنوعيها المتبلور (Crystalline) وغير المتبلور (Non-Crystalline) في درجة حرارة الغرفة - الى الكسر قبل حدوث أي تشوه لدن ، كاستجابة للإجهاد المسلط عليها ومن ثم يحدث الكسر الهش (Brittle Fracture) .

عملية حدوث الكسر الهش تتضمن تكون الشق خلال المقطع العرضي للمادة وتقدمه وباتجاه عمودي على الحمل المسلط . يكون نمو الشق عادة في السيراميك المتبلور خلال الحبيبات (Grain) وعلى طول المستويات البلورية التي تحتوي كثافة ذرية عالية .

متانة الكسر للمواد السيراميكية المقاسة بصورة فعلية هي اقل من المتانة المحسوبة بصورة نظرية والمسندة الى الأسس النظرية ، ولعل هذا يعود الى وجود شقوق مجهرية (Flaws) صغيرة جدا في المادة تعمل كرافعات اجهاد (Stress Raisers) ومن ثم تزيد من قيمة الإجهاد المسلط على المادة . ان درجة تضخيم الإجهاد المسلط بواسطة هذه الرافعات تعتمد على طول الشق و نصف قطر تقوس حافة الشق وكما في المعادلة التالية :

$$\sigma_M = 2\sigma_\circ \left(\frac{a}{p_t} \right)^{\frac{1}{2}}$$

حيث ان :

σ_M :- اقصى اجهاد متولد حول حافة الشق .

$\sigma_\circ$:- قيمة الإجهاد المسلط .

a :- طول الشق السطحي او نصف طول الشق الداخلي .

P_t :- نصف قطر تقوس حافة الشق .

رافعات الإجهاد قد تكون دقائق سطحية متناهية في الصغر ، شقوق داخلية (شقوق مجهرية) ، مسامية داخلية او جسيمات غريبة . على سبيل المثال فان الرطوبة والملوثات الموجودة في الجو قد تسبب شقوق سطحية في الألياف الزجاجية المصنعة حديثا وهذه الشقوق تؤثر بشكل سلبي على مقاومة المادة .

قياس قابلية المواد السيراميكية على مقاومة الكسر عند وجود شق في المادة يمكن ان يعبر عنها بمتانة الكسر (Fracture Toughness) التي يمكن تعريفها طبقا للمعادلة الآتية :

$$K_{C,IC} = Y\sigma\sqrt{\pi a}$$

حيث :

K_C:- معامل شدة الإجهاد الحرج .

K_{IC} :- متانة الكسر .

Y :- معامل خالٍ من الوحدات يعتمد على شكل كل من العينة والشق .

σ :- الإجهاد المسلط .

a :- طول الشق السطحي او نصف طول الشق الداخلي .

(K_{IC} ، K_C) تعتمد على كون الحالة (plain stress) او(plain strain) وهذا يعتمد على أبعاد العينة ونوع التحميل أي أن الشق لا يتقدم خلال المادة عندما يكون الجانب الأيمن من المعادلة اقل من متانة الكسر للمادة . ان قيمة متانة الكسر للمواد السيراميكية هي عموما اقل من قيمتها للمعادن .

متانة الكسر في المواد السيراميكية تعتمد على طريقة التصنيع المستعملة وعلى المعاملات والمتغيرات التي ترافقها ، كما ان حجم العينة يؤثر على متانة الكسر حيث ان العينة الأكبر حجما تكون اكثر تحسساً للعيوب واقل متانة للكسر .

المواد السيراميكية تكون مقاومتها للانضغاط اعلى من مقاومتها للشد . حيث انه في حالة اجهاد الضغط لا يوجد تضخيم للإجهاد ناتج عن العيوب كما في اجهاد الشد . كما انه يمكن تحسين مقاومة الكسر في المواد السيراميكية عن طريق تكوين اجهادات ضغط متبقية (Residual Stresses) على السطح .

ان التحولات الطورية التي تحصل داخل المادة والتي تعمل على تكوين انفعالات (Strains) داخل الجسم تعد وسيلة ممتازة لتقليل نمو الشق الى أدنى حد وهذه الطريقة بدأت تستخدم مؤخراً لإنتاج اجزاء سيراميكية متينة تستخدم في تطبيقات عديدة مثل اجزاء المحركات الأوتوماتيكية (Automotive Engines) .

على اية حال فان متانة الجسم السيراميكي يمكن التحكم بها عن طريق السيطرة على المتغيرات الآتية :

1. **حجم العيب او الشوائب في المسحوق السيراميكي الأولي .**
2. **المسامية في الجسم السيراميكي الملبد (Sintered Body) .**
3. **الطور الذي يعيق تقدم الشق خلال الجسم .**

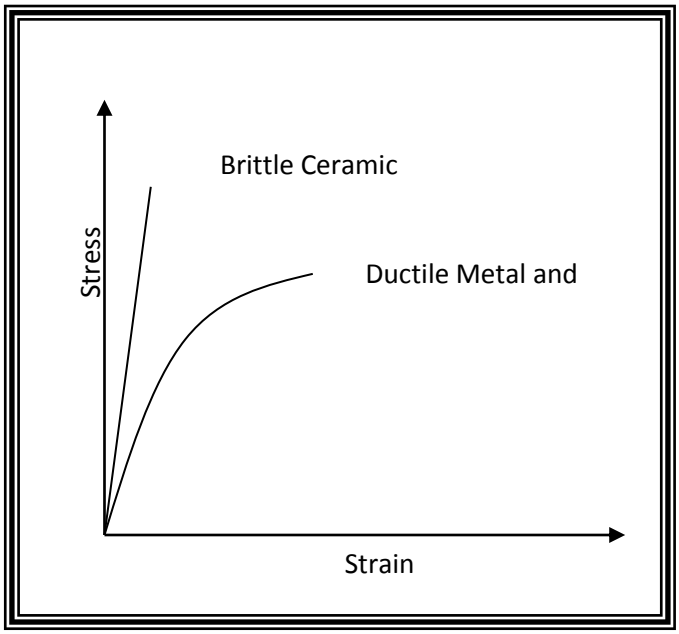
إن الخواص الميكانيكية تشمل أنواعاً من القوى مثل متانة الانضغاط (Compression) strength، ومتانة الصلادة (Hardness)، ومتانة الصدمة(Impact (strength، وذلك لتحديد مدى مقاومة بطانة الأفران للفعل الميكانيكي عند درجات الحرارة العالية وفي ظروف الاستعمال المختلفة

إن هذه القوى تعتمد على عدة عوامل تحدد على أساسها القيمة النهائية لهذه الخواص مثل التركيب الداخلي، ظروف التشكيل، ودرجة حرارة المعاملة الحرارية. حيث إنّ هذه العوامل هي التي عندها يتمدد مقدار التماسك للجسم الحراري وإمكانية الحفاظ على هذا التماسك عند تغير الظروف أثناء الاستعمال.

وبصورة عامة فان المواد السيراميكية مواد صلدة وهشة (Rigid and Brittle) ، ويلاحظ ذلك من خلال رسم العلاقة البيانية لمنحني الإجهاد – الانفعال للمواد السيراميكية وكما هو مبين في الشكل (2-7) أدناه:

يلاحظ من ذلك بأن المادة السيراميكية مادة هشة تفشل بانفعال قليل دون أن

تمر بنقطة خضوع ، وهذا يعني بان المنطقة اللدنة فيها قد اختفت ،والجدول (1-7) يوضح بعض هذه الخواص. فالصلادة ومعامل يونك لكثير من مواد السيراميك الجديد يفوق المعادن .



شكل (2-7) يبين مقارنة العلاقة للاجهاد – الانفعال للمادة السيراميكية مع المادة المطيلية والسبائك.

المادة Materials	الصلادة Hardness	معامل يونك Elastic modulus "E" MPa
السيراميك التقليدي Tradition Ceramics		
الطابوق Brick ، الطين الحراري Fire clay	NA	95×10^2
كاربيد السيلكون Silicon Carbide (Sic)	2600 Hv	460×10^3
السيراميك الجديد New Ceramic		
الومينا Alumina (Al_2O_3)	2200 Hv	345×10^3
نتريتيد البورون Boron Nitride. Cubic	6000 Hv	NA
كاربيد التيتانيو (TiC) Titanium Carbide	3200 Hv	300×10^3
كاربيد التنكستن (WC) Tungsten Carbide	2600 Hv	700×10^3
الزجاج glass		
زجاج السليكا Silica (SiO_2) glass	500 Hv	69×10^3

الجدول (7-1) يبين بعض الخواص للمواد السيراميكية

NA=Not Available (غير متاح)

نظرياً فان المقاومة للمواد السيراميكية أعلى من المعادن بسبب الأواصر بين ذراتها التي لا تسمح بالانزلاق كما تم التطرق له سابقاً.

المواد السيراميكية ذات مقاومة ضعيفة إزاء الأحمال الشدية . أي أنها ذات مقاومة شد قليلة ولكنها ذات مقاومة عالية للانضغاط High Compression Strength لهذا فان المادة السيراميكية تستخدم لتقاوم أحمال الانضغاط ولا تستخدم لمقاومة أحمال الحني والشد إلا في حدود . ولزيادة مقاومة المادة السيراميكية هناك عدة طرق منها سطحية والأخرى داخل التركيب البنيوي للمادة وهذه الطرق هي :

1- **تقليل الحجم الحبيبي في المنتجات السيراميكية المتعددة التبلور .**
2- **تقليل المسامية .**
3- **زيادة مقاومة الأسطح التي تتعرض إلى اجهادات كعمليات التزجيج بمعامل تمدد حراري قليل .**
4- **استخدام الألياف للتقوية .**
5- **استخدام المعاملات الحرارية .**

إنّ عمليات الفشل يمكن تمييزها

عن الضرر المحتمل حصوله بسبب التصميم والذي يمكن تخمينه من خلال متوسط عمر القطعة ، حيث أن معظم نظريات هندسة السيراميك تعتبر الهشاشية عاملاً مهماً لحصول الفشل التي يعبر عنها بـ(K_{IC}) وهي متانة الكسر الحرجة أو مقاومة الكسر وهذا العامل يجب أن لا يتغير بارتفاع درجة الحرارة ، ولهذا فيمكن اعتبار البنية السيراميكية دالة مع درجة الحرارة حيث يجب معرفة المدى الذي فيه تكون هذه الخواص ثابتة بارتفاع درجات الحرارة وهذا ما ينطبق مع بحثنا وهناك بعض الخواص المتعلقة ببحثنا التي يمكن استعراض قسم منها .

يحدث الكسر في الأجسام الصلبة تحت تأثير الإجهاد ويمكن إيجاز الكسر بمرحلتين :

الأولى : مرحلة تكوين الشق (Crack Initiation) .

الثانية : مرحلة انتشار الشق (Crack Propagation) .

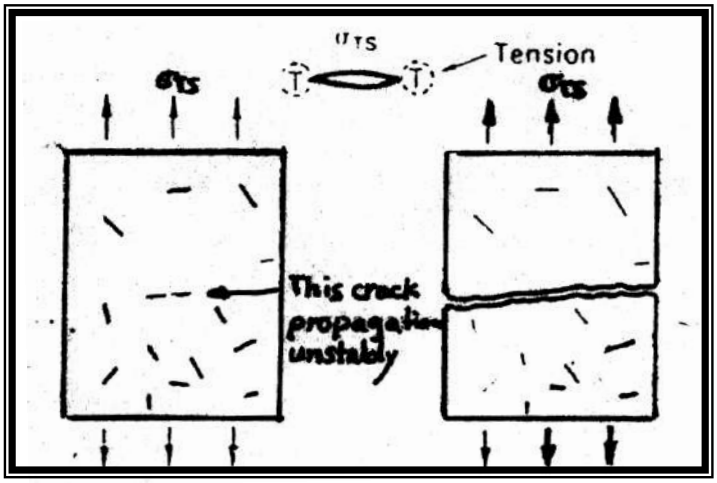
ويمكن تصنيف الكسر حسب الطاقة اللازمة للكسر إلى كسر هش وكسر مطلي والكسر الهش يحتاج إلى طاقة قليلة في حين أن الكسر المطلي يحتاج إلى طاقة كسر عالية . في الكسر الهش لا يحدث أي تشوه دائمي لذا فمن المستحيل إعادة تركيب الأجزاء المكسورة .

(2-2-7) مقاومة الكسر Fracture Strength

سبق وأن ذكر بأن المواد السيراميكية هي مواد هشة وتكون قوية في حالة الانضغاط وضعيفة في حالة الشد والانحناء ولهذا فان مقاومة الانضغاط هو المعيار المعتمد بالنسبة إلى المواد السيراميكية حيث يظهر الكسر الهش في البداية على سطح النموذج وذلك بسبب الاجهادات المتكونة في العيوب الموجودة وبصورة مسبقة في المادة (شقوق ، ثقوب) ويتركز الإجهاد في هذه المناطق مؤدياً إلى حدوث كسر هش سريع (Catastrophic Failure) وحسب نظرية (Griffith).
يمكن قياس مقاومة الكسر للمواد السيراميكية بالطرق الآتية:-

(3-2-7) مقاومة الشد Tensile strength

عند حساب مقاومة الشد يعرض النموذج إلى إجهاد محوري منتظم يزداد بالتدريج إلى أن يحدث الكسر ، وتقاس مقاومة الكسر في الشد البسيط من مقياس الإجهاد اللازم لجعل طول الشق في النموذج ينتشر بشكل سريع وغير مستقر والشكل (3-7) يوضح قياس مقاومة الكسر باختبار الشد والمعادلة المستخدمة لحساب مقاومة الكسر هي :



الشكل (3-7) يوضح قياس مقاومة الكسر

$$\sigma_{TS} = \frac{P}{A}$$

حيث أن :

σ_{TS} : مقاومة الكسر (Mpa) .

A : مساحة المقطع العرضي (mm^2) .

P : الحمل المسلط (N) .

يكون إجراء اختبار الشد للمواد السيراميكية صعباً بسبب :

1. **صعوبة تشغيل المواد السيراميكية لتصنيع النماذج الخاصة بالاختبار .**
2. **الفكوك المستخدمة في تثبيت النموذج قد تؤدي إلى الفشل بسبب تركيز الاجهادات .**
3. **حساسية المادة السيراميكية بتركيز الجهد .**

وتؤدي هذه الصعوبات إلى زيادة حدوث التشتت في المعلومات التي لا يمكن الاعتماد عليها عند التصميم وعند الحاجة الضرورية جدا لأجراء هذا الاختبار للمواد السيراميكية ولهذا وجب استخدام احتياطات للحصول على نتائج تقريبية كاستخدام وسائد مطاطية في فكوك مسطحة لتجنب كسر العينة داخل الفك أو الاستعاضة عن هذا الاختبار باختبار آخر أكثر دقة وملائمة وهو اختبار الانضغاط .

(4-2-7) مقاومة الانضغاط Compression strength

وتعرف على انها مقياس لمقاومة الجسم للضغط الخارجي المسلط عليه سواء أكانت على شكل نقطة ام عدة نقاط ، اذ يعد هذا الفحص قياسا شائعا لتقييم صفة ميكانيكية مهمة للأجسام السيراميكية.

وتقاس مقاومة الانضغاط بعدة طرائق منها ما يسمى بمقاومة السحق البارد (cold crushing strength) ويمكن الحصول على مقاومة الانضغاط من المعادلة الآتية:

$$S = \frac{F}{A}$$

حيث إنّ

(S) مقاومة الجهد البارد بـ. MPa

(F) أعلى قوة لحصول فشل في النموذج بوحدات N.

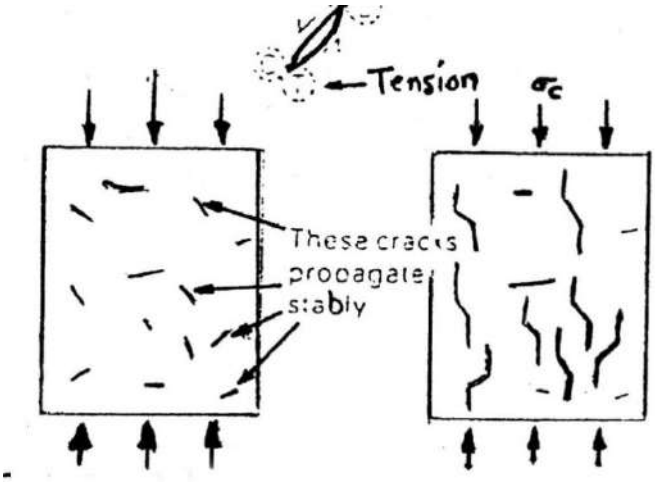
A مساحة مقطع العينة m^2

وتتأثر مقاومة الانضغاط بعدد من العوامل منها درجة حرارة الحرق اذ ان ارتفاع درجة حرارة الحرق يسبب زيادة في مقاومة الانضغاط ناتجة من ازدياد الكثافة، اذ يؤدي ارتفاع درجة حرارة الحرق الى زيادة التفاعلات بين الاكاسيد المختلفة التي ينتج عنها مركبات ذات درجة انصهار واطئة تسبب زيادة الطور الزجاجي السائل الذي يؤدي الى زيادة الكثافة وخفض المسامية . وتزداد بشكل عام مقاومة الانضغاط ايضا بزيادة ضغط التشكيل عند الكبس وهذا يرجع الى زيادة رص الحبيبات واقترابها من بعضها البعض فتقل بذلك المسامية وتصبح عملية التلبيد والنمو الحبيبي اسهل واسرع . كذلك تتأثر مقاومة الانضغاط بطريقة التشكيل ، اذ ان التشكيل بالطريقة اللدنة يؤدي الى خفض مقاومة انضغاط النموذج لارتفاع محتوى ماء التشكيل للنموذج الذي يسبب زيادة في حساسية الاطيان في اثناء عملية التجفيف وما ينتج عنها من تقلص عال وظهور تشققات تخفض بدورها من مقاومة الانضغاط .

وتنخفض مقاومة الانضغاط ايضا بوجود التشققات في المادة ، اذ ان الشق في حالة الانضغاط ينتشر باستقرار وتنحرف الشقوق خارج اتجاهاتها الاصلية لتنتشر بموازاة محور الانضغاط ، أي ان الكسر لا يحدث بسبب الانتشار السريع لشق واحد ولكن يحدث بسبب التمدد البطيء لعدد من الشقوق التي تشكل منطقة التهشم (Crushed Zone)ومقاومة الانضغاط بصورة عامة أكثر ملائمة للمواد الهشة وللسيراميك بصورة خاصة حيث أن مقاومة الانضغاط تعادل (10-8) مرة اكبر من مقاومه الشد وذلك بسبب العيوب الداخلية والشكل (4-7) يوضح ذلك:

وتستخدم نفس المعادلة التالية لاستخراج إجهاد التهشم (σ_c) حيث :

$$\sigma_C = \frac{P}{A} \qquad \text{MPa}$$



الشكل (7-4) يوضح قياس مقاومة الكسر باختبار

ملاحظة: أبعاد نماذج اختبارات الانضغاط حسب المواصفات الأميركية تكون اسطوانية طولها ضعف القطر اما المواصفات البريطانية فهي مكعبات.

(7-2-5) مقاومة الانحناء Bending Strength

إن اختبار الانحناء من أكثر الاختبارات المستخدمة للمواد السيراميكية وذلك لسهولتها وسهولة تحضير نماذج الاختبار .وتستخدم هذه الطريقة لحساب معامل التمزق ومعامل المرونة (Modulus of rapture and modulus of elasticity) بطريقه اختبار الانحناء ذي الثلاث أو أربع نقاط . الشكل (7-5) يوضح ذلك والشكل (7-6) يوضح توزيع الاجهادات. بحسب معامل التمزق للنماذج ذات المقطع المتوازي مستطيلات في اختبار الانحناء ذي النقاط الثلاث من المعادلة التالية :

$$\sigma \max = \frac{3PI}{2Bh^2}$$

حيث أن :

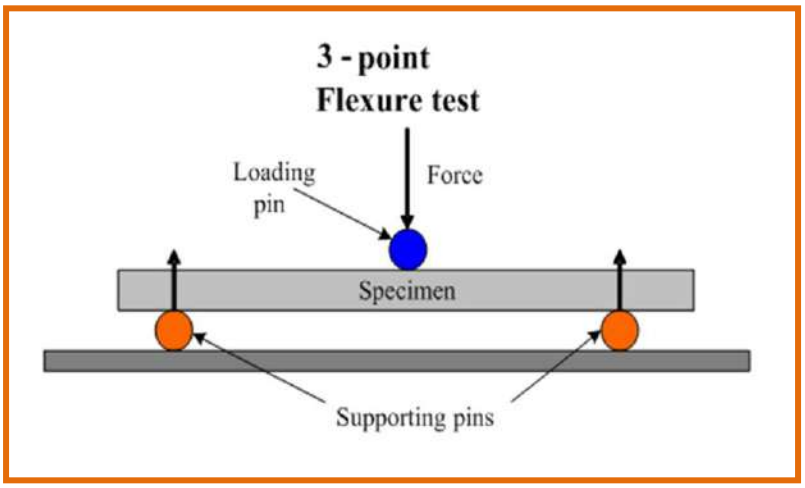
σ_{mxs} : اقصى جهد تتحمله العينة .

l : المسافة بين المرتكزات (mm) .

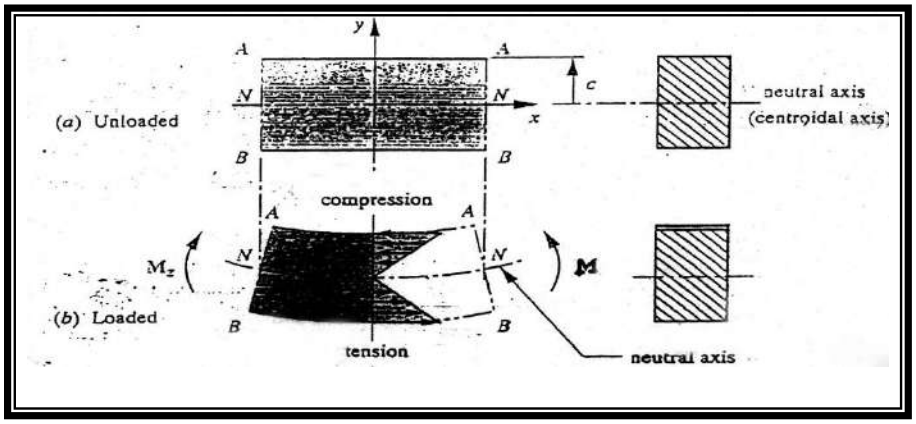
h : سمك النموذج (mm) .

P : الحمل المسلط (N) .

B : عرض النموذج (mm) .



الشكل (7-5) يوضح قياس مقاومة الانحناء ذي الثلاث نقاط



الشكل (7-6) يوضح توزيع الاجهادات في اختبار الانحناء

(6-2-7) مقاومة الشد ألانفلاقي

هذا الفحص يتضمن تسليط قوة انضغاطية على طول العينة القرصية بمعدل متساو لغاية حدوث الفشل ، قوة الحمل هذه تسبب إجهادا انضغاطيا على طول خط عمل القوة التي تعمل كثلاث قوى مركبة مما يعطي مقاومة كبيرة للعينة اكبر مما لو كانت مسلطة على خط مستقيم واحد، لذلك نستعمل مخدات صلبة فوق العينة وتحتها في نقطة تماسها مع القوة والقاعدة. تم تحديد مقاومة الشد الانفلاقي للنماذج بعد الحرق وفقا للمواصفة القياسية الامريكية لاختبار المواد ASTM C496/C 496M – 04 وذلك بقياس أبعاد النموذج (القطر والارتفاع) بعد الحرق باستخدام قيمة قياس (Vernia) ، إذ إن كل نتيجة أو قيمة هي معدل لثلاث قيم ، يتم حساب مقاومة الشد الانفلاقي من المعادلة الآتية :

$$T = \frac{2P}{\pi l d}$$

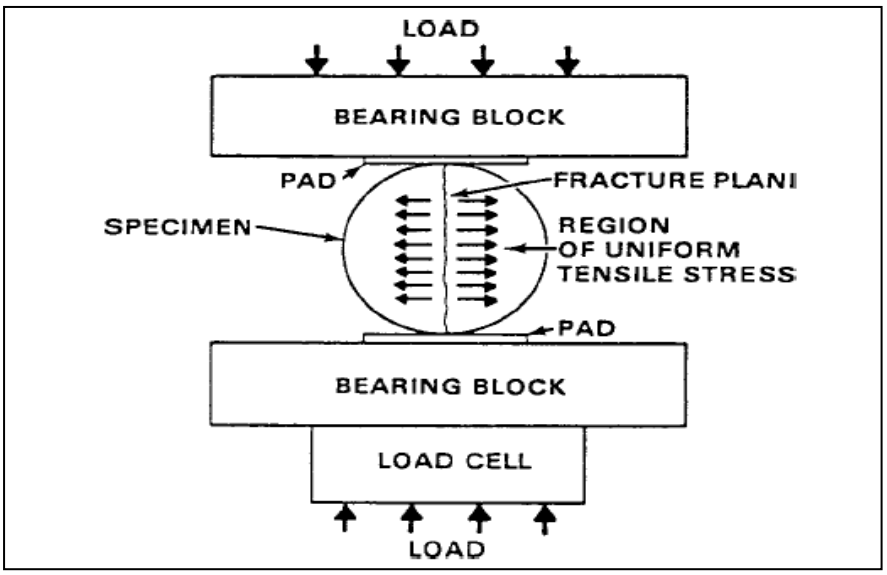
T = مقاومة الشد ألانفلاقي (MPa).

P = الحمل المسلط حتى الكسر (N).

l = سمك العينة بعد الحرق (mm).

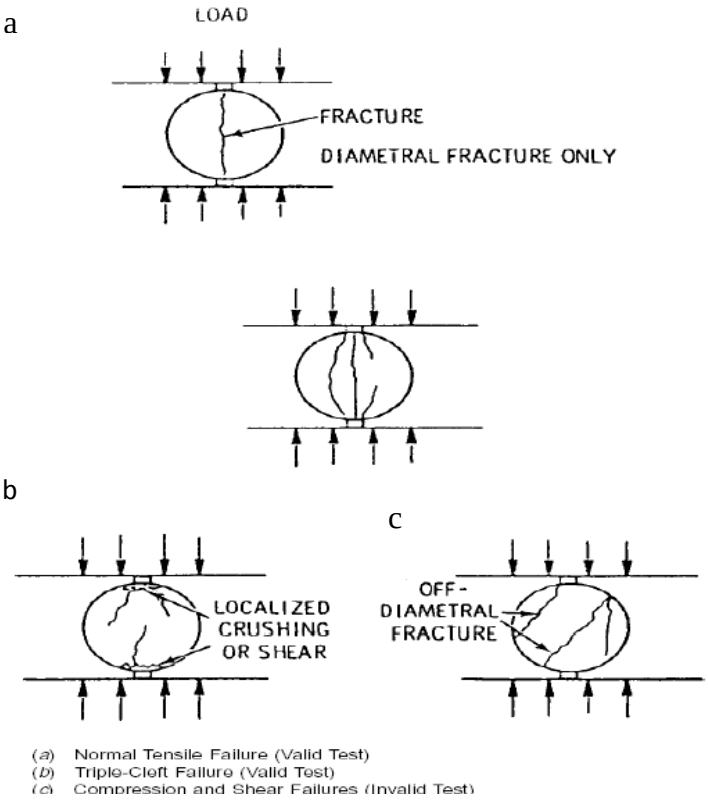
d = قطر العينة بعد الحرق (mm).

الشكل (7-7) في ادناه يوضح القوة المسلطة على النموذج عند فحصه لمعرفة مقاومة الشد الانفلاقي، إذ تكون القوة المسلطة على النموذج قوة انضغاطية من الاعلى والاسفل ويلاحظ ان الشق يبدأ بالنشوء في العينة نتيجة الاجهادات الشدية المتولدة في النموذج بعد تسليط القوة الضاغطة.



شكل (7-7) مسار الانكسارات المتوقعة بشكل قطري منتظم بعد تسليط الحمل

هناك عدة انكسارات تحدث في العينة ، فالشكل (7-8) في ادناه يوضح الانكسارات المتوقعة بعد تسليط الحمل على النموذج حيث يكون الانفلاق اما بسبب الاجهادات الشدية العمودية على فعل القوة الضغطية المسلطة كما في الشكل (a) او بسبب حدوث شقوق ثلاثية كما في الشكل (b) او بسبب تولد قوى ضغطية وقصية متمركزة في منطقة تسليط القوة الضغطية تؤدي الى انهيار النموذج كما في الشكل (c). ومن ذلك نستنتج ان فحص مقاومة الشد الانفلاقي يمكن تطبيقه فقط على المواد السيراميكية والمواد الهشة كالزجاج، ولا يصلح استعماله للمواد البلاستيكية والمعدنية او الاجزاء المغلفة او المطلية.



شكل (7-8) مسارات الانكسارات المتوقعة بعد تسليط الحمل على العينة

a- الاجهادات الشدية العمودية

b–حدوث شقوق ثلاثية

c- تولد قوى ضغطية وقصية

العوامل المؤثرة على المتانة الميكانيكية للسيراميك

1- تأثير المسامية (Effect Of Porosity)

هناك بعض تقنيات تصنيع المواد السيراميكية التي تتعامل مع المساحيق السيراميكية والتي تعمل على تشكيلها بالكبس بشكل متتابع حتى الشكل المطلوب . تتضمن هذه التقنيات تكون مسامات او فجوات بين حبيبات المسحوق خلال عملية التصنيع ، بعد ذلك وخلال المعاملة الحرارية فان بعض هذه المسامات تزال وتمتلئ في حين يبقى البعض الآخر من المسامات من دون ان يمتلئ مكوناً أجساماً ذات نسب مسامية مختلفة . هذه المسامية تؤثر بشكل ضار على كل من خواص المرونة والمقاومة ، على سبيل المثال فانه يمكن ملاحظة إن معامل المرونة (Modules Of Elasticity) لبعض المواد السيراميكية يتناقص مع زيادة الكسر الحجمي للمسامية وكما في المعادلة الاتية :

$$E = E_{\circ}\left(1 - 1.9\Phi + 0.9\Phi^{2}\right)$$

حيث ان :

E :- معامل مرونة المادة السيراميكية بوجود المسامات .

$E_{\circ}$:- معامل مرونة المادة السيراميكية بعدم وجود المسامات .

Φ :- الكسر الحجمي للمسامية .

كذلك فان معامل المرونة للمادة المركبة التي تحتوي على نوعين من المواد مثل السيراميك والبوليمر التي تحتوي على فجوات يمكن ان تملأ بمادة اخرى فانه يخضع لقانون المخاليط (Rule of Mixtures) والذي ينص على :

$$E_{comp.(ceramic+polymer)}=E_{cer}(.V_f)_{cer.}+E_{poly.}(V_f)_{poly.}$$

حيث ان:

$E_{comp.}$: معامل المرونة للمادة المركبة .

$E_{cer.}$ ، $E_{poly.}$: معامل المرونة للمادة السيراميكية والبوليمرية على التوالي .

$(V_f)_{cer.}$ ، $(V_f)_{poly.}$: الكسر الحجمي للمادة السيراميكية والبوليمرية على التوالي .

والذي يمكن تطبيقه لجميع الخواص من اجهاد وكثافة وغيرها.

تؤثر المسامية بشكل سلبي على مقاومة الانحناء لسببين : الاول ان المسامية تقلل من مساحة المقطع العرضي المتعرض للحمل المسلط . والسبب الثاني هو كون المسامية تعد رافعات اجهاد ، وعلى سبيل المثال فان وجود مسامية في المادة بكسر حجمي (10%) يقلل مقاومة المادة بحدود (50%) من قيمة المقاومة المقاسة للمادة غير المسامية .

2- تأثير اجهادات الضغط المتبقية (Effect Of Compressive Residual Stresses)

ان تكوين طبقة سطحية تحتوي اجهادات ضغط متبقية يمكن ان تزيد من مقاومة المادة السيراميكية . وقد برهنت هذه التقنية بشكل جيد في الزجاج ، حيث ان وجود اجهادات ضغط سطحية متبقية تعيق الفشل الناتج من العيوب السطحية حيث ان اجهادات الضغط يمكن ان تتغلب على العيب

السطحي قبل ان يبدأ بالتقدم . كذلك فان اجهادات الضغط المتبقية تعمل على زيادة مقاومة الصدمة الحرارية ومقاومة الحك.

هنالك مبدأ مهم لتوليد طبقة سطحية تحوي اجهادات ضغط متبقية وهو ان يكون حجم الاجهادات المتبقية الموجودة فيها اكبر من الاجهادات الموجودة في المادة الاساس .

توجد عدة طرق لتكوين الطبقة السطحية الحاوية على اجهادات ضغط متبقية وهي :

1- تكوين طبقة خارجية لها معامل تمدد حراري منخفض كما في عملية التزجيج او ما يعرف بتقسية الزجاج (Tempering of Glass) .

2- استخدام الاجهادات الناتجة من التحول الطوري كما في سيراميك الزركونيا .

3- الحشو (Stuffing) الفيزيائي للطبقة الخارجية بالذرات او الايونات كما في طريقة الترسيخ الأيوني (Ion Implantation) .

4- التبادل الأيوني للأيونات الصغيرة مع الايونات الكبيرة . حيث ان الايونات الكبيرة تذهب باتجاه المادة الاساس وتجعل السطح في حالة ضغط وهي مشابهة لعملية الحشو الفيزيائي ، وتستخدم بشكل كبير في الزجاج عن طريق وضع الزجاج في منصهر ملحي يحتوي ايونات كبيرة . تستبدل الايونات الصغيرة بالكبيرة وتجعل السطح في حالة انضغاط . هناك صعوبة واحدة تواجه هذه التقنية وهي الموازنة بين اجهادات الضغط السطحية و اجهادات الشد المتكونة في مركز الجسم.

3 - تأثير درجة الحرارة (Effect Of Temperature)

تؤثر درجة الحرارة على متانة السيراميك من خلال عدة عوامل منها الجو المحيط (Atmosphere) في أثناء اجراء الاختبار ووجود المكونات المعدنية او الأطوار الزجاجية ضمن البنية السيراميكية ، فمثلا عندما يتعرض السيراميك الى جو تآكلي (Corrosive) مع درجات حرارة عالية فان احد الاحتمالين يمكن ان يحدث :

أولا :- الحماية حيث تتكون طبقة أوكسيدية على السطح وتميل الى معالجة العيوب الموجودة على السطح عن طريق تغطيتها ومن ثم تنتج زيادة في المتانة .

ثانيا :- المحيط التآكلي يهاجم السطح ويعمل على تكوين نقر (Pits) على السطح او تحفير (Etching) ذلك السطح في مناطق اختيارية منه وفي هذه الحالة ينتج انخفاض في المتانة .

كما ان المواد السيراميكية الحاوية على أطوار زجاجية عند حدود الحبيبات فان ارتفاع درجة الحرارة الى درجة كافية يؤدي الى انخفاض المتانة بسب تلدين هذه الأطوار .

4 – تأثير الحجم الحبيبي (Effect of Grain Size)

بصورة عامة فان متانة المواد السيراميكية تتناسب بشكل عكسي مع معدل الحجم الحبيبي (G). تكون الحدود الحبيبية منطقة ضعيفة نتيجة تراكم العيوب عندها بعد ذلك يتقدم العيب خلال الحبيبة . نلاحظ من خلال الشكل ان نقصان الحجم الحبيبي يؤدي الى زيادة المتانة ، ولكن ليس بشكل مستمر حيث ان المواد السيراميكية ذات الحجم الصغير جداً يحدث فيها الكسر نتيجة العيوب السطحية في المادة وتصبح المتانة غير حساسة نسبيا الى الحجم الحبيبي وهذا ما يمكن ملاحظته في الشكل حيث يصبح اقل ميلا بالنسبة الى الحجوم الحبيبية الصغيرة .

(3-7) الخصائص الحرارية Thermal properties

تعد المواد السيراميكية واحدة من المواد التي تتميز بالعزل الحراري الجيد (معامل توصيل حراري منخفض مقارنة بالمعادن) ولذلك معظم التطبيقات الحرارية الشائعة للسيراميك تتضمن عوازل حرارية ممتازة مع ارتفاع درجة الحرارة.

(1-3-7) التوصيلية الحرارية Thermal Conductivity

إن التوصيلية الحرارية هي مقياس لعملية الانتقال الحراري عبر المادة ، والـــــذي يعطى بالعــلاقة

$$(\Delta Q/\Delta t) = -KA(\Delta T/\Delta x)$$

حيث ان قياس التوصيلية الحرارية للنماذج على شكل قرص قطره كبير نسبة الى سمكه فعند وجود تدرج حراري ($\Delta T/\Delta x$) خلال وسط مادي بالاتجاه x فان التيار الحراري الناتج من الفرق في درجات الحرارة خلال مساحة المقطع العرضي العمودية لانسياب الحرارة A . حيث ان الاشارة السالبة تعني ان انسياب الحرارة يكون باتجاه الحرارة الاقل كما انه يفيد في جعل قيمة K موجبة. ان الخواص الفيزياوية التي تأخذ جهدا كبيرا والتي تكون ذات اهمية لخواص المواد السيراميكية هي الخواص التي ترتبط بصورة مباشرة بتغير سلوك المادة مع تغيير درجات الحرارة ومنها خاصية التوصيل الحراري ، وممكن ايضا ان تعرف التوصيلية الحرارية على انها كمية الحرارة المنتقلة خلال وحدة المساحة للمادة لوحدة السمك ولوحدة الفرق في درجة الحرارة على جهتي المادة في وحدة الزمن . وتعرف أيضا على انها الحساب النسبي لقابلية المادة لتشتيت الحرارة .

ان المواد السيراميكية لها مدى واسع لقيم التوصيلية الحرارية بالمدى المعروف (9.195×10^{-12}-3.65×10^{-12})$\frac{J}{nm.s.K}$) حيث أن أعلى توصيلية هي للمواد عالية الكثافة والمواد ذات الطور الواحد (Signal Phase) . اما المواد ذات التركيب المعقد complex Matrix او المواد ذات التركيب المسامي التي تعد ذات طورين ايضا فأنها تمتلك توصيلية اقل مما في النوع الاول وهي حوالي ((3.215×10^{-13})$\frac{J}{nm.s.K}$)).

ان التوصيلية الحرارية تنتقل بأربع اليات مهمة وهي الاشعاع والحمل والشبيكة (فونون) وتوصيلية الالكترون . ان احدى الطرائق العملية المتبعة لحساب قيمة التوصيلية الحرارية للمادة الصلبة العازلة هي تعريض احد اوجه النموذج لمصدر حراري وحساب درجة الحرارة عند الوجه المقابل . حيث توضع العينة في انحدار حراري حتى يتم توازن انسياب الحرارة الواصلة الى الوجه الاخر وبذلك يتم حساب الخواص الحرارية بحساب العوامل المؤثرة . وبصوره عامه يلاحظ ان هناك زيادة في قيم التوصيلية الحرارية مع زيادة درجة الحرارة في المنطقة التي دون درجة الانتقال الزجاجي (T_g) وهي الدرجة التي تتحول فيها المادة المتراكبة الى الطور الزجاجي وهو احد اطوار مرور المادة المتراكبة خلال عملية التلبيد وحسب مكونات المادة المتراكبة ، ولكن فوق درجة الانتقال الزجاجي(T_g) فان التوصيلية الحرارية تبدا بالنقصان مع زيادة درجة الحرارة.

وهناك عوامل تؤثر على التوصيلية الحرارية هي :

1- التركيب الكيمياوي للمادة.

2- المعاملة الحرارية السابقة للمادة.

3- الحالة الفيزياوية للمادة.

4- مسامية المادة والحجوم الحبيبية وتوزيع المسامات.

5- درجة الحرارة المستعملة لفحص المادة .

(2-3-7) مقاومة الصدمة الحرارية (Thermal Shock)(TSR):

كما هو معروف ان المواد السيراميكية عموما مواد هشة وذات حساسية تأثر عالية للصدمة الحرارية . فعندما يتعرض النموذج السيراميكي الى تغير مفاجئ بدرجات الحرارة ، يحصل عندها انحدار حراري شديد الذي بدوره سوف يغير في حجم النماذج وبالتالي سوف تتولد اجهادات داخلية تسبب الانهيار المفاجئ . ان الجسم السيراميكي الذي يمتلك معامل تمدد ايجابي سوف يتعرض سطحه الى الانضغاط في حالة زيادة درجة الحرارة وهذا يتفق مع خاصية المادة السيراميكية في تحملها للاجهادات الانضغاط ، وعلى العكس فعند تبريد النموذج السيراميكي المفاجئ ، فأن سطح النموذج سيتعرض الى اجهادات شد مسببة فشل النموذج وتكسره ، وهذا متفق مع قابلية المواد السيراميكية الضعيفة للاجهادات الشدية .

وبناء عليه فان المواد ذات التمدد الحراري القليل لها مقاومة صدمة حرارية عالية بسبب قلة الاجهادات المتولدة .

في البداية يتعرض السطح الخارجي إلى حرارة ويبدأ سريان الحرارة إلى الداخل وعبر طبقات المادة إلى المركز وهنا تلعب توصيلية المادة الحرارية (Thermal diffusivity (D)) دوراً مهماً وكما يأتي :

$$D = \frac{\lambda}{\rho \times C}$$

حيث أن :

ρ : الكثافة (Density) .

C : الحرارة النوعية (Specific heat) .

λ : التوصيل الحراري (Thermal conductivity) .

وعلى هذا الأساس تكتب معادلة مقاومة الصدمة الحرارية كالأتي :

$$R_{th} = \frac{\sigma_f(1-\mu)}{E\alpha}$$ **في حالة الصدمة السريعة**

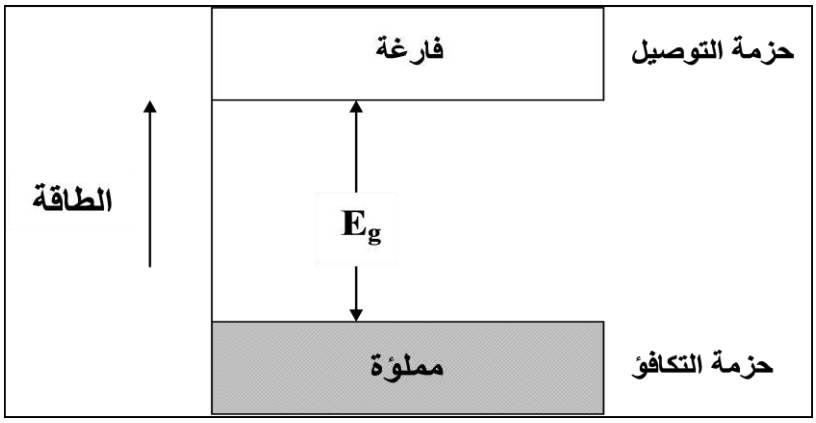
$$R_{th} = \frac{\sigma_f K(1-\mu)}{E\alpha}$$ **في حالة الصدمة البطيئة**

حيث (μ) هو نسبة بوازون (Poisson's ratio) ،σf متانة الكسر، α معمل التمدد الحراري، E معامل يونك، K معامل التوصيل الحراري.

وعلى هذا الأساس تعرف الصدمة الحرارية على أنها الجهد الذي يؤدي إلى الفشل عند تعرض المادة إلى مدى متغير من درجات الحرارة .

(4-7) العوازل الكهربائية Dielectrics

في الكثير من المواد والسيراميك وغيرها، الكترونات التكافؤ مرتبطة بشدة مع نوى ذراتها ، ولذلك وفي غياب الالكترونات الحرة تكون التوصيلية ضعيفة جدا ، وبموجب نظرية حزم الطاقة للمواد الصلبة فان حزمة التكافؤ تكون مملوءة تماما في درجة الصفر المطلق . كما توجد فجوة طاقة كبيرة بين حزمة التكافؤ وحزمة التوصيل كما موضح في الشكل (7-9) في ادناه :-



شكل (7-9) مخطط حزم الطاقة لمادة عازلة في درجة حرارة الصفر المطلق

وان سمك هذه الفجوة قد يكون (10 ev) فاكثر بحيث انه حتى لو سلط مجال كهربائي فان الالكترونات لا تتحرك بعدد كبير باتجاه واحد ، فكل الكترون يتحرك معين بعاكسة الكترون اخر يتحرك بعكس اتجاه حركته لان الحزمة مملوءة تماما ، مثل هذه المواد تسمى العوازل (Dielectric).ان فجوات الطاقة للعوازل تختلف من مادة الى اخرى ، وبصورة عامة فان أي مادة فيها منطقة ممنوعة سمكها يساوي اكثر من (6 ev) تكون عازلة .

ومن الجدير بالذكر ان جزيئات العازل تتكون من شحنات موجبة واخرى سالبة وكثيرا ما يكون مركز الشحنات السالبة منطقيا على مركز الشحنات الموجبة لهذه الجزيئات ، ولكن عندما تقع هذه الجزيئات تحت تاثير مجال كهربائي خارجي فان الشحنات الموجبة سوف تزاح باتجاه المجال بينما تزاح الشحنات السالبة لهذه الجزيئات بالاتجاه المعاكس ، ونتيجة لذلك فان مركز الشحنات

الموجبة لم يعد منطبقا على مركز الشحنات السالبة بل تفصلها مسافة صغيرة وعندئذ نقول ان الجزيئة اصبحت مستقطبة .

ولكن فيما اذا كان المجال الكهربائي كبيراً جداً فان هذا قد يؤدي الى اكتساب الالكترونات للطاقة اللازمة للتوصيل وهكذا يتحطم العازل.

ويقصد بخواص العزل في المواد " الخواص العزلية" وتحدد هذه الخواص ضمن اطارين:-

الاول:- يرتبط بنوعية الشحنة المفيدة في المادة ويصف كيفية تاثيرها وحدود حركتها عند تسليط مجال كهربائي خارجي مستمر او متناوب ويشار الى العنصر الذي يتناول هذه الخواص بالسماحية Permitivity.

الثاني :- يصف مدى تحمل الجهد الكهربائي المسلط عليه فلكل عازل قابلية محددة تحمل الجهد الكهربائي وعند تجاوز هذا الحد ينهار العازل ويصبح موصلا ويشار الى الجهد الذي يحدث عنده الانهيار (جهد الانهيار) بمتانة العزل او متانة الانهيار "Dielectric Strength " ويختلف من مادة الى اخرى ويتأثر بعوامل خارجية وداخلية في المادة اما الخواص الاخرى بإداء العوازل السيراميكية وجودتها فهي تشمل الخواص الفيزيائية ومنها (الكثافة ، درجة حرارة الحرق ، المسامية ، التقلص الناتج عن الحرق ،...الخ).

(1-4-7) تصنيف المواد العازلةClassification Dielectric

من خلال العلاقة بين المجال الكهربائي والاستقطاب يمكن تصنيف المواد العازلة الى :-

1- مواد دائمة الاستقطاب (Permanent Polarization):-

وهي المواد التي تكون مستقطبة حتى بغياب المجال الكهربائي من امثلتها جزيئات الماء .

2- العوازل الخطية (Linear Dielectric) :-

وهي المواد التي لا تتغير فيها قابلية المادة للتكهرب والسماحية مع الاستقطاب وشدة المجال الكهربائي ، وتكون كل من السماحية وقابلية التكهرب دالة للموقع .

3- العوازل اللاخطية (Non-Linear Dielectric):-

وهي المواد التي تمتاز بوجود علاقة بين المجال الكهربائي والازاحة الكهربائية وبين الثوابت (قابلية المادة للتكهرب ، السماحية) وان العلاقة بينهما تكون معقدة في بعض الاحيان ، وتقع السيراميكيات ضمن هذا الصنف، وتتضمن هذه العوازل خواص منها:-

1-الخاصية الفيروكهربائية:-

وفيها تكون العلاقة وثيقة وظاهرة بين المجال الكهربائي والسماحية وتمتاز بالصفات الاتية :-

1- التخلف(Hystersis):- وتحدث هذه الصفة عندما تاثيرات فولتيات مختلفة على العازل ،إن العلاقة بين الاستقطاب والمجال الكهربائي على مادة فيروكهربائية في هذا الصف من المواد يمكن توضيحها كما ياتي:- ان تسليط مجال كهربائي على مادة فيروكهربائية يؤدي الى استقطاب الجزيئات باتجاه معاكس للمجال الكهربائي ويصل هذا المجال الى حالة الاشباع عند قيمة محددة للمجال الكهربائي حيث تصطف الشحنات المفيدة بصورة كاملة ، وعند خفض المجال الكهربائي الى الصفر تلاحظ بقاء المادة مستقطبة ، وتتطلب جهدا اضافيا بالاتجاه المعاكس لكي تستطيع عكس اتجاه الاستقطاب فيكون متابعا لمتجه المجال الكهربائي وهذا يعني ان متجه الاستقطاب يتخلف ويتاخر عن متابعة المجال الكهربائي.

ومن اهم المواد التي تمتاز بهذه الصفة المُركب $BaTiO_3$

2- تمتاز المواد الفيروكهربائية بسماحية عالية جدا ، وتصل الى السماحية الى اعظم قيمة لها عند درجات حرارة عالية محددة او شدة مجال معينة.

3- العلاقة الصريحة والواضحة بين (parameters) العازل ودرجة الحرارة ووجود الخصائص الفيروكهربائية فقط عند مدى حراري محدد ، وجميع المواد الفيروكهربائية تمتلك هذه الصفة ، فالسماحية وبعض الخواص الفيزياوية تتغير درجة الحرارة ،

وتوصف خصائص المادة من خلال تحديد نقاط الانتقال او ما يسمى بنقاط كوري (Curie Point) حيث مقدار السماحية عند اقصاها وفقدان الخصائص الفيروكهربائية يحصل عندما

تكون درجة حرارة المادة اعلى من درجة حرارة كوري ، ونقاط كوري تشبه تلك النقاط التي تحدد الخواص الفيرومغناطيسية للمادة ، المواد السيراميكية التي تمتاز بالخاصية الفيروكهربائية تسمى بالفيروسيراميكية (Ferro ceramic) وهي تمتلك نقطة كوري واحدة في المدى الحراري العالي وفي بعض المواد فان درجة حرارة كوري تمتد لمناطق حرارية عالية اكبر من (200°C) واقل من (100°C) وتعتمد درجة حرارة كوري على مدى نقاوة المادة ، وفي المدى الاكبر من درجة حرارة كوري تمتاز المادة بالخصائص الباراكهربائية ويكون التغيير بين السماحية ε ودرجة الحرارة T كما في العلاقة التالية :-

$$\in = \frac{C}{T - \theta_1}$$

وتسمى هذه العلاقة بقانون كوري – وايز (Curie – weiss)

حيث C ثابت كوري – وايز،θ نقطة كوري العظمى (نقطة حرجة) وتظهر هذه الحالة عندما تكون الاستقطابية الاتجاهية هي الطاغية على الاستقطابين الالكتروني والايوني.

2- الخاصية البيزوكهربائية:-

عند تسليط جهد ميكانيكي على بلورة ،فإنها ستتشوه ونمط تشويها يعتمد على درجة التماثل .وان الجزيئات او مجاميع الايون الموازية بعضها للبعض الاخر سوف تخضع لدوران صغير عند انفعال البلورة.

اذا كانت البلورة متمركزة التماثل (Centro symmetric) ، أي انه هناك مراكز للتماثل في النظام الذري، ولهذا ان أي ازاحة سوف لن تشوش التماثل وتوزيع الشحنة لا يتأثر حيث ان كل جزيئة تتكون من توزيع شحنات متماثلة حول المركز .

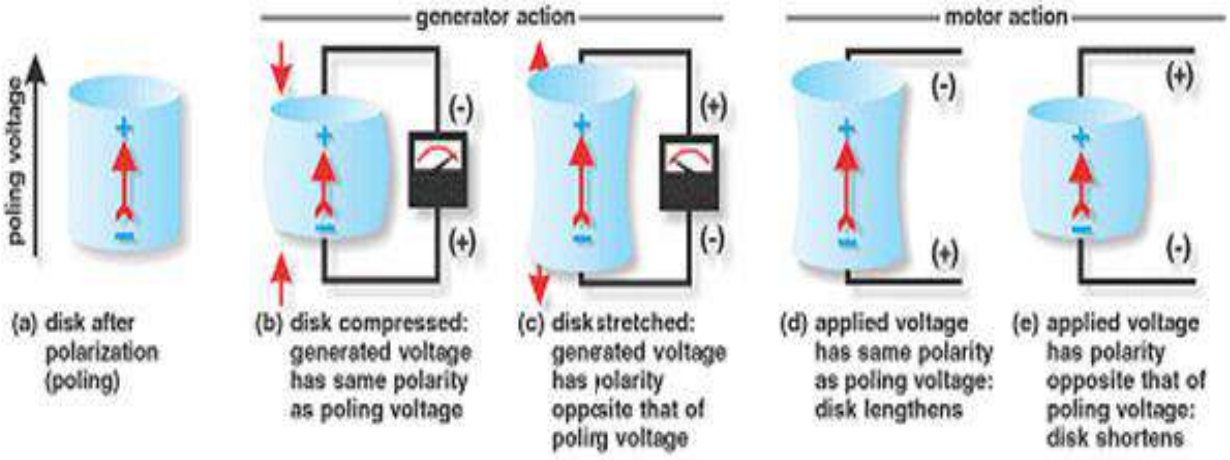
على كل حال فان التركيب غير مركزي ، ولهذا فان الدايبول ثنائي القطب موجود ،بعدها الاجهاد سوف يقدم ازاحة غير متمائلة ، ستؤدي الى حدوث الاستقطاب.

ان التغير في الاستقطاب والناتج عن الاجهاد الميكانيكي نسميه "البيزوكهربائية" وان البلورات التي تكون فيها ثنائيات الاقطاب موجهة تكون دائما "بيزوكهربائية".

وتلك التي فيها ثنائيات الاقطاب مرتبة على ان عزومها يلغي احدهما الاخر تكون بيزوكهربائية فقط اذا كان التركيب غير متمركز التماثل.

ان البلورة البيزوكهربائية هي (ميكانيكية - كهربائية) التأثير بصورة متبادلة ولها استجابة خطية تزود كليهما بمجال وانفعال صغيرين ، ان الحركة ثنائية القطب تكون عرضة لعملية التثبيط ،ولهذا عند تسليط مجال كهربائي متناوب على بلورة بيزوكهربائية فان ازاحة ثنائية القطب سوف لا تكون بنفس الطور مع المجال ولكنها عادة تتباطأ ، ان اختلاف الطور يتغير مع التردد وكل بلورة لها تردد نبني عنده امتصاص الطاقة في اقصاه . وهذا الرنين يكون حاد جدا ولهذا مثل هذه البلورات ممكن استعمالها كرنانات او كمسيطرات تردد في المذبذبات.

ان ملح روشيل ($KNaC_4H_4O_6.4H_2O$) له اقوى تأثير بيزوكهربائي معروف . بينما الكوارتز له تأثير اقل قوة ولكنه من اكثر المواد مثالية للاستعمالات العملية بسبب نوعيته المرنة الممتازة ومتانته الكبيرة وديمومته ، وان الرنين او التردد الطبيعي لبلورة الكوارتز يعتمد على الحجم والاتجاه بالنسبة الى مخطط المحاور البلورية ، وبالاختبار المناسب للأبعاد عند قطع البلورة يمكن تحضير نموذج باي تردد طبيعي مرغوب بالمدى من 50Hz الى اعلى من 10^8Hz، والتي لا تعتمد على درجة الحرارة ، شكل (7-10) .



شكل (7-10)

(2-4-7) الاستقطاب Polarization

ان جميع الاوساط المادية تتركب من جزيئات وهذه تتألف من جسيمات مشحونة (نوى الذرات والالكترونات) والجزئيات تتأثر بالمجال الكهربائي لأنه يسلط قوة على هذه الجسيمات المشحونة مما يؤدي الى ازاحة كل الشحنات الموجبة والسالبة عن موضع الاتزان، ومن وجهة النظر المجهرية (Microscopic) يقال عن العازل انه مستقطب polarized.

ان هذا الفصل بين الشحنات يولد ما يسمى بالدايبول او (ثنائي القطب) الكهربائي . ويمكن تصنيف جزيئات العازل الى جزيئات قطبية (polar molecules) وجزيئات لا قطبية (Non-polar Molecules). ففي الجزيئات اللا قطبية ينطبق مركزا ثقل البروتونات والالكترونات عند انعدام المجال الكهربائي الخارجي، اما في الجزئيات القطبية فان مركزي ثقل البروتونات والالكترونات لا ينطبقان حتى بغياب المجال الخارجي، فعند تسليط مجال كهربائي على الجزيئات اللاقطبية يظهر دايبول محتث (Induced dipole) يمثل عزمه حاصل ضرب أحدى الشحنتين في المسافة بينهما . أما تسليط مجال كهربائي على الجزئيات القطبية فإنها تتأثر بعزم ازدواج يعمل على تدوير الدايبول

باتجاه شدة المجال الكهربائي وهذا المجال يزيد من قيمة عزم الدايبول وتمتلك الجزيئة القطبية دايبول دائم (permanent dipole).

ان الدايبولات الناشئة او الدائمة في المواد العازلة لابد ان تتحرك او تتذبذب بتأثير الحرارة التي تكسب هذه الدايبولات طاقة حركية نتيجة تأثير المجال الكهربائي فأذا تعرض العازل لمجال كهربائي تردده في نطاق التردد البصري، يسمى هذا الاستقطاب بالاستقطاب الالكتروني (Electronic Polarization) او الاستقطاب البصري (Optical Polarization). حيث يحدث بسبب الفصل بين مركز الشحنات الموجبة في النواة ومركز الشحنات السالبة للالكترونات الذي كان منطبقاً قبل تسليط المجال كما في الشكل [7-11a].

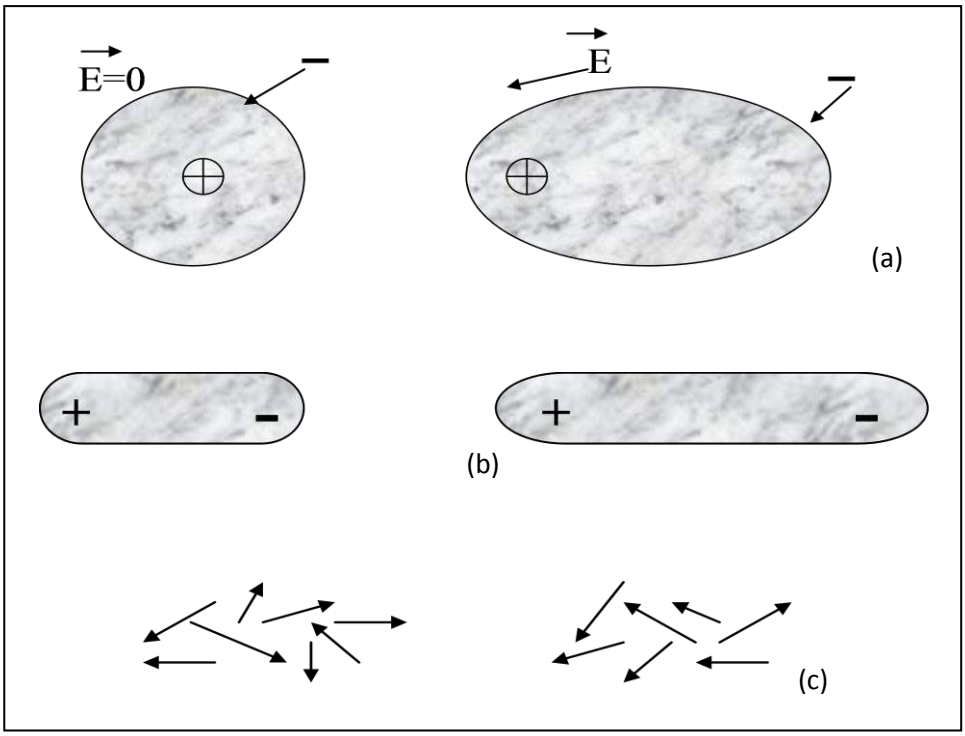
أما الاستقطابية التي تنشأ نتيجة هذا الفصل سواء كانت الدايبولات الناشئة دائمية او مؤقتة فتسمى بالاستقطابية الذرية او الايونية (Atomic or Ionic Polarization) وهي نصف الاستقطاب في جميع الجزيئات وتسمى في بعض الاحيان الاستقطابية الجزيئية (Molecular Polarization) وتبرز اهميتها في المجالات الكهربائية عندما يكون ترددها تحت الحمراء كما في الشكل [7-11b]:

ويرافق الاستقطاب الايوني نوع آخر من الاستقطاب نتيجة دوران الدايبول حول محور التنافر حيث تترتب الدايبولات باتجاه المجال المسلط ، ويسمى هذا النوع بالاستقطاب الاتجاهي او الدوراني (Orientational Polarization) كما في الشكل [7-11c]:

ان هذه الحركة للمواد التي تتميز بالدايبولات الدائمية تكون مستمرة ومتنقلة من مكان لآخر وتزداد هذه الحركة بازدياد درجة الحرارة ، ويلاحظ ان الانخفاض في درجة الحرارة يؤدي الى سكون الدايبولات حيث ان فقدان الدايبولات حركتها يفقد المادة قدرتها على الاستقطاب .

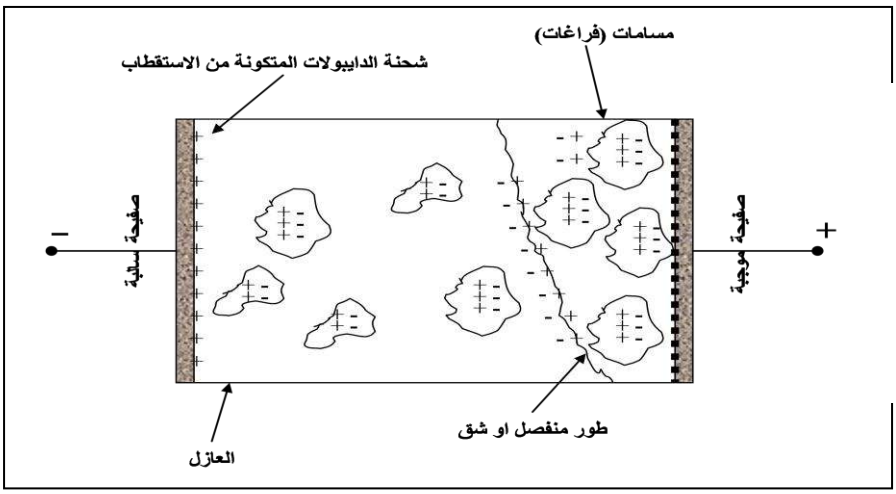
هناك نوع اخر من الاستقطابية يجب اخذه في الحسبان خصوصاً في المواد السيراميكية وهي الاستقطابية البينية (Interfaced Polarization) وتظهر نتيجة العيوب في التشكيل او من

الفراغات او نتيجة عدم التجانس في المادة او بسبب الاطوار المنفصلة الناشئة داخل المادة او نتيجة ذرات شائبة ، فتتخلل المادة حواجز نتيجة هذه العيوب او الشقوق حيث تعمل على وقف سير الشحنات الطليقة في المادة وبذلك فأن هذه الشحنات تتجمع عندها وتؤدي الى ظهور شحنات معاكسة على طرفي الحاجز ، وبذلك تنفصل هذه الشحنات داخل المادة نفسها مما يؤدي الى نشوء دايبولات في المادة وتمتد في مناطق كبيرة داخلها تعتمد على تجانس المادة ومدى خلوها من العيوب والشوائب كما في الشكل (7-12) .



شكل (7-11) انواع الاستقطاب (a)الاستقطاب الالكتروني (b) الاستقطاب الايوني (c)الاستقطاب الاتجاهي

ومن اكثر المواد السيراميكية التي تظهر فيها الاستقطابية هي الالومينا (Al_2O_3) عند استخدامها كمنتجات سيراميكية وذلك بسبب صعوبة تلبيد هذا المركب وملء المسامات فيه فتتولد شحنات في الفجوات (Space charge) عند استقطابها بمجال كهربائي نتيجة تراص الدايبولات حول هذه الفجوات. ويظهر تأثير هذا النوع من الاستقطابية في الترددات الواطئة بالاعتماد على نوع العيوب وفقدان التجانس الذي يسبب الاستقطاب البيني.



شكل (12-7) الاستقطابية البينية (استقطاب الشحنات الفراغية) الناشئة عن المسامية والاطوار المنفصلة او الشقوق او العيوب في الجسم السيراميكي)

(3-4-7) سعة العازل Dielectric Capacitance

إن الأساس المعتمد في العوازل السيراميكية هو العناصر السعوية (Capacitive elements) التي تستخدم في الدوائر الالكترونية والعازلية الكهربائية وان معظم الخواص للعوازل يتعلق بما يسمى ثابت العزل(Dielectric constant) عامل الفقد للعازل (Dielectric loss factor) وقوة العزل (Dielectric strength) حيث أن العاملين الأول والثاني يتعلقان بالخواص الكهربائية في حين أن العامل الثالث يتعلق بالخواص الميكانيكية. وقد احصت الدراسات الجديدة عوامل أخرى مقرونة بخواص العازل منها مدى التردد (Frequency range) كذلك المدى الذي تعمل فيه ظروف الجو المحيط (The range of enviromental) كذلك درجات الحرارة . عادة يتم تصنيع العوازل الكهربائية أما من مواد بلاستيكية عضوية أو مواد سيراميكية والأولى أرخص ثمناً وذات قابلية عالية على التشكيل وبأبعاد دقيقة ومسيطر عليها أكثر من الثانية ولكن هنالك دواعٍ لاستخدام المواد السيراميكية في إنتاج عوازل ذات مواصفات خاصة كأن تكون مقاومه للزحف (Creep) أو مقاومة للأحمال العالية بدرجة حرارة الغرفة وكذلك مقاومة عالية لتغيرات ظروف المحيط (درجة الحرارة ، التأكسد ، التسامي ، التحلل) وكذلك القابلية على إنتاج سدادات محكمة للغازات لذلك عند الاستخدام المتكرر للعازل يجب ملاحظة عدد من العوامل الأساسية وخصوصاً عندما يعمل العازل في ظروف المناخ الجوية حيث يجب

أن يقاوم عوامل التمدد الحراري (Thermal expansion) مقاوم للاجهادات الحرارية وكذلك الصدمة (Impact) بالإضافة إلى القابلية العالية للتشكيل بأشكال متعددة وبانهاءات عالية .

إن معظم التخصصات الهندسية تختص بدراسة العلاقة ما بين مادة العازل إلى سعته ونعني بالسعة هنا القابلية على خزن الشحنات الكهربائية التي يخزنها العازل (Q) والتي تعطى بالعلاقة التالية .

$$Q = C\,V$$

حيث أن (V) الفولتية المطبقة ، (C) السعة ، والفولتية المسلطة تتناسب مباشرة مع معدل الشحنة المخزونة التي تساوي التيار المار خلال العازل حيث يعطى :

$$V = \frac{Q}{C} \Rightarrow I = C\frac{\Delta V}{\Delta t}$$

إنّ سعة المتسعة لها علاقة بعاملين احدهما هندسي والآخر يتعلق بمادة العازل فالعوازل الصفائحية ذات مساحة (A) وسمك (d) تحتسب السعة لها كالآتي :

$$C_o = \frac{A}{d}\varepsilon_o$$

حيث ان :-

C_0 : سعة العازل عندما يكون بين لوحيه الفراغ او (الهواء)

(ε_o) هي سماحية الفراغ (Permittivity) أو ثابت العزل

في الفراغ وقيمته تساوي (8.854×10^{-12} F/m) . إذا كان العازل المستخدم بين لوحي المتسعة هو السيراميك فان سماحية العازل (ε')

(ثابت العزل) وان سعة العازل تعطى بالعلاقة التالية :

$$C = C_o \frac{\varepsilon'}{\varepsilon_o} = C_o K'$$

حيث (K′) يسمى بنسبة السماحية أو نسبة ثابت العزل للمادة إلى ثابت العزل بالفراغ ، وهي خاصية المادة التي تحدد السعة عندما يستخدم عازل من مادة سيراميكية وعند التعويض ينتج :

$$C_p = \frac{A.\ \varepsilon'}{d.\varepsilon_o}$$

وعند استخراج (ε′) ينتج :

$$\varepsilon' = \frac{C_p . d}{A.\varepsilon_o}$$

(4-4-7) سماحية العازل Dielectric Constant or Permittivity

هو النسبة بين الطاقة المخزونة إلى الطاقة المخزونة في الهواء الذي يحتل نفس الحجم . وهي تقاس بالقابلية على خزن الكهربائية أو المتسعة (Capacitance) إن سماحية العازل تتغير بتغير درجات الحرارة. أو هي النسبة بين سعة العازل الصلب الموضوع بين لوحين موصولين إلى السعة التي يشغلها الفراغ بين نفس اللوحين وهي يعتمد على الكثافة (كثافة المادة الصلبة Density) الترتيب الجزيئي (Molecular arrangement) قابلية استقطاب الجزيئات (Polarization of the molecules) .

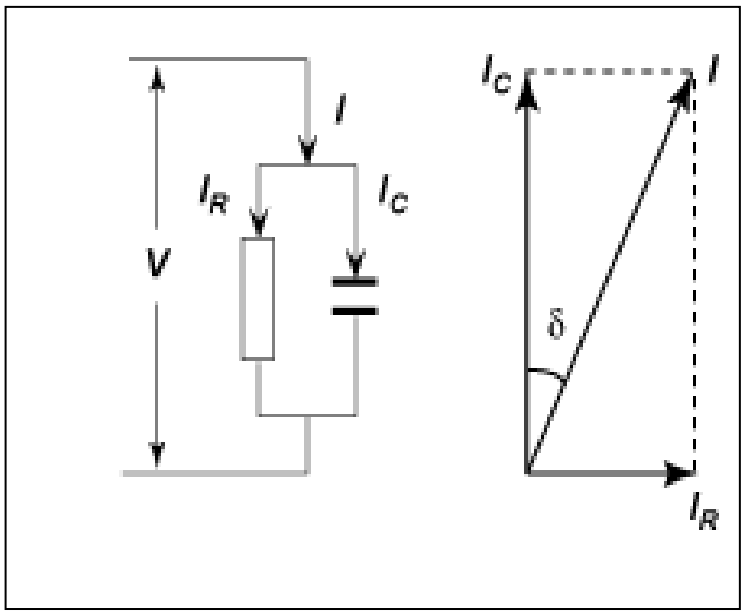
(5-4-7) زاوية الفقد Loss Angle

إن العوازل التي يمر خلالها تيار كهربائي وفولتية ، فان زاوية الطور التي تكون بينهما (θ) والتي تكون قيمتها (90^o) فما يفقد من هذه القيمة (90^o)

خلال العازل يعرف بزاوية الفقد (δ) حيث أنها تساوي الفرق بين (90^o) وزاوية الطور خلال العازل أي :

$$\delta = 90^o - \theta$$

وان قيمة (δ) للمواد السيراميكية عادة أقل من (5^o) الشكل (7-13) .



شكل (7-13) زاوية الفقدان العزلي

(6-4-7) عامل الفقد Loss Factor

هو العامل الناتج من حاصل ضرب سماحية العازل في ظل زاوية الفقد أي :

$$\epsilon'' = \epsilon' \tan\delta$$

كذلك:

$$\epsilon'' = \frac{d}{\omega \epsilon_o R_p A}$$

حيث: ω يمثل التردد الزاوي ويحسب من العلاقة: $\omega=2\pi f$ وأن f هو تردد المصدر، R_p مقاومة المادة العازلة.

عامل الفقد يستخدم في تدريج العوازل ذات الترددات العالية ، وان هذه الخاصية مهمة في الاعتبار بالعوازل ذات الترددات ودرجات الحرارة العالية ، حيث أن القيمة للتردد عادة تزيد على واحد .

تكمن اهمية تحديد الفقدان العزلي (ε` ، tanδ) في التطبيقات الكهربائية في معرفة كفاءة العوازل الكهربائية حيث ان الفقدان العزلي المفرط يؤدي الى تسخين العازل الكهربائي عند الترددات العالية فيؤدي الى حدوث فشل ميكانيكي وكهربائي.

وهناك عدة عوامل مؤثرة على ثابت العزل الكهربائي والفقدان العزلي :

1. التردد : يؤدي زيادة التردد للمجال الكهربائي الى نقصان في قيمة ثابت العزل ،حيث ان زيادة التردد من الترددات الواطئة الى الترددات العالية يؤدي الى نقصان في مساهمة الاستقطاب بسبب عدم قدرة الثنائيات القطبية الكهربائية المحتثة او الدائمية على مواكبة تغير المجال المسلط . وقد وجد بعض الباحثين زيادة ثابت العزل عند نقصان التردد دون (2×10^4)هيرتز بسبب زيادة الاستقطابية البينية او استقطاب الشحنة الفراغية الذي يؤدي ايضا الى زيادة الفقدان العزلي .

2. درجة الحرارة : وجد عند زيادة درجة الحرارة ازدياد قيمة ثابت العزل الكهربائي بسبب زيادة تحركية الايونات (Ionic mobility) وتحر كية الشوائب البلورية فيما لو كانت بلورية التركيب (Crystal imperfection mobility) .وقد وجد ايضا انه عند زيادة درجة الحرارة تكون هناك زيادة كبيرة في الفقدان العزلي (ε` ، tanδ ) بسبب زيادة فقدان التوصيل والناتج من زيادة تركيز حاملات الشحنة أي ان زيادة درجة الحرارة تقلل المقاومية الكهربائية للعازل وبالتالي يزداد الفقدان العزلي ($\varepsilon$` ، tanδ) .

3. الرطوبة (Humidity) : يعتمد تأثير الرطوبة على خواص سطح العازل الكهربائي . حيث وجد ان النماذج البورسلينية ذات نسبة مسامية عالية تكون ذات ثابت عزل وفقدان عزلي اكبر من

بقية انواع النماذج غير البورسلينية عند الترددات الواطنة بسبب امتصاص الرطوبة من الجو التي تتراكم على السطح حيث يمكن ان تنفذ الى داخل العازل وتتفاعل مع الايونات القاعدية فتتحرر ايونات الهيدروجين ، وتنتشر هذه الايونات داخليا مع الايونات القاعدية ، كما وجد ان عملية التزجيج تزيل تأثير الرطوبة.

(7-4-7) متانة العازل Dielectric Strength

عند تسليط مجال كهربائي قوي القيمة الحرجة على عازل ، فان تيار كهربائي عالٍ نسبيا سوف يسري ولهذا فان خواص العزل للعازل سوف تفقد ويصبح موصلاً .

وان قابلية العازل على اسناد او مقاومة فولتية عظمى مسلطة عليه لمدة طويلة بدون فشل او انهيار تسمى قوة العزل .(Dielectric Strength).

وتقاس متانة العازل بدلالة المجال الكهربائي (E_{br}) وهو يمثل المجال الذي ينهار او يفشل عنده العازل فان :-

$$E_{br} = \frac{U_{br}}{h}$$

وتقاس متانة العازل او الانهيار الكهربائي بوحدات $\frac{kV}{cm}$ او $\frac{kV}{mm}$

ويمكن ان نستدل على حدوث الانهيار في المادة العازلة من خلال مشاهدة احدى الحلات التالية:

1- ثقب في العينة يحدث عندما تصل المتانة الكهربائية الحقيقية للمادة العازلة .

2- حرق او صهر يحدث عندما تسخن المادة العازل موضعيا ويحدث الانهيار .

ومن المهم الاشارة الى ان متانة العازل تختلف باختلاف الفولتية المسلطة حيث في الفولتية

(d.c) تعطي 25-30 % قيماً اعلى من الفولتية (a.c) عند تردد (60Hz) . كما في NaCl حيث تكون قيمة (E_{br}) ($3.8 \times 10^7 \frac{v}{cm}$) في (d.c).

وتكون ($1.4*10^6 \frac{v}{cm}$) في (a.c) ، وهذا الاختلاف ممكن ان يعزى لفقدان الاسترخاء .

وعند تسليط فولتية متناوبة على عازل فان هناك عدة ظواهر تحدث في العازل كالتوصيل الكهربائي والاستقطاب ،حيث تؤدي زيادة الفولتية على العازل الى زيادة تيار التسرب والتيار السعوي للفولتية المتناوبة ،وعند وصول الفولتية الى اعظم قيمة لها تمثل حالة انهيار العازل فانه في هذه اللحظة يمر بتيار التوصيل خلال العازل وبصورة متزايدة بعدها تبدأ الفولتية بالتناقص بسبب تناقص مقاومة العازل .وهذه الحالة تمثل غالبا كدائرة تمر بين اقطاب المصدر.

ان انهيار العوازل الصلبة تصف كل مراحل العزل حيث تسبب تحطم المادة ،وتتكون الظاهرة من الارتفاع السريع للتيار بالنسبة للفولتية فوق قيمة معينة.



هل تعلم!!!!!

أن شكلاً شجيرياً لمسار الشرارة الكهربائية يحصل داخل المادة العازلة نتيجة الانهيار الكهربائى.

العوامل المؤثرة على متانة العزل الكهربائي

تعتمد متانة العزل الكهربائي على عدة عوامل ومنها :

1. التركيب الداخلي للعازل
2. هندسة ونوع الاقطاب
3. الرطوبة

4. التردد

5. السمك

6. درجة الحرارة

7. المعدل الزمني لصعود الفولتية

ولا يمكن وصف الية الانهيار من خلال عامل ثابت تتغير معه وذلك لان شروط التجريب ستتغير في اثناء القياس حيث تكون العوامل متداخلة ومؤثرة بعضها على البعض الاخر

وسنستعرض هذه العوامل كالاتي : -

1- التركيب الداخلي :

حيث تعتمد متانة العازل الكهربائية على التركيب الداخلي للعازل من حيث تجانسه ونقاوته، اذ ان وجود العيوب مثل الانخلاعات او تداخل البلورات ممكن ان يسبب مسارات توصيل مسببة سرعة كبيرة في الانتشار وكذلك فأن الالكترونات الموجودة بسبب ذرات الشوائب او التهيج الحراري يعطي طاقة بسبب المجال المسلط وهذه تُفقد بسبب اصطدامات الكترونية ذرية. واذا أي من الالكترونات حصل على طاقة كافية لخلق زوج (الكترون - فجوة) بواسطة اصطدام الكترون بالكترون بعدها فأن الكترونات اضافية سوف تعمل وتصطدم بطريقة مماثلة مسببة الانهيار.

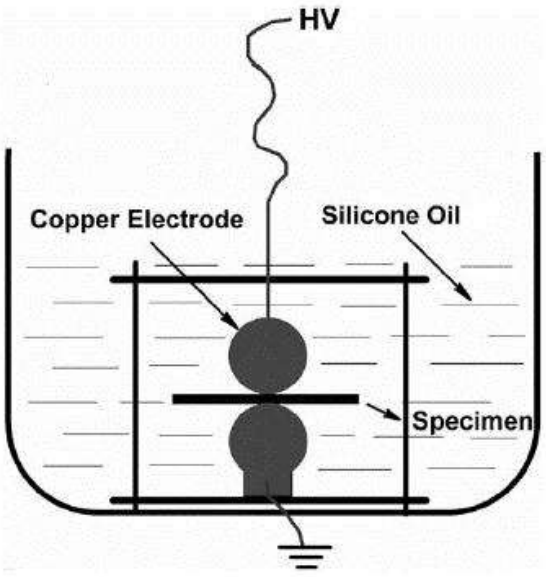
ومن الجدير بالذكر ان وجود العيوب في العازل تؤثر في بداية الانهيار ويمكن تقدير ذلك من خلال قياس ابعاد تلك العيوب وانواعها. كذلك فأن العوازل البلورية تتأثر من حيث الاتجاهات البلورية وقوة الاواصر البلورية مع الفولتية المسلطة وبالتالي مع متانة العزل الكهربائي.

لذلك يجب ان تكون النماذج نقية ومتجانسة وحرة من الشد وان تكون السطوح الجانبية نظيفة (بدون ابخرة ماء او غازات ممتزة او اغشية زيتية) لتجنب حدوث التيارات السطحية.

2- هندسة ونوع الأقطاب :

ان لأقطاب التوصيل شكل (7-14) بين مصدر الجهد العالي والعازل تأثيراً حيث زيادة مساحة الأقطاب (قياساً لأبعاد العازل) تقلل من فولتية الانهيار وذلك لتزايد النقاط النافذة من العازل واحتمال

حصول الانهيار في اضعف تلك النقاط وكذلك تؤثر هندسة ونوع الأقطاب في امكانية حدوث حرق او صهر او شق في العازل .



شكل (7-14) اقطاب التوصيل الكهربائي في منظومة فحص متانة العزل الكهربائي.

3- الرطوبة

للرطوبة تأثير على المتانة الكهربائية للعازل المسترطب حيث يتناقص مقدار جهد الانهيار عند زيادة المحتوى الرطوبي . وتزداد نسبة نفوذ الرطوبة بزيادة درجة الحرارة.

4- التردد :

أن الخسائر في المجالات المتناوبة تكون أعلى بكثير من المجالات المستمرة، لان الخسارة في ظاهرة الاسترخاء مثل حركة ثنائيات القطب تعتمد على معدل تغير المجال، ونتيجة لذلك فأن شدة الانهيار الكهروحراري بصورة عامة تكون اقل للمجالات المتناوبة وتقل بزيادة تردد فولتية المصدر.

ومن الجدير بالذكر ان انهيار العازل النقي لا تعتمد كثيراً على تردد الفولتية. حيث انه لا يعتمد على شكل او زمن التذبذب (النبض). حيث ان صدمة واحدة ذات متانة كافية تفي بالغرض.

اما الانهيار الكهروحراري فأنه يعتمد بصورة كبيرة على التردد. حيث ان التردد يرتبط مباشرة بتسخين العازل ويزداد الميلان للانهيار الكهروحراري مع الارتفاع بالتردد. وذلك بسبب التسخين الداخلي عند الترددات العالية.

5- السمك

ان تغيير متانة العزل الكهربائي مع سمك العازل ليست خطية ولكنها تتناقص بزيادة السمك لذلك يفضل في قياس متانة العزل الكهربائي في ان يكون سمك العازل ذا ابعاد قليلة لتقدير قيمة الانهيار بصورة دقيقة ويمكن أن تعزى سبب التناقص الى صعوبة استرجاع الحرارة ولفظها من وسط العازل الى المحيط مما يؤدي الى زيادة الفقدان العزلي وتناقص المتانة. وكذلك فأن الزيادة في السمك تقلل المجال الكهربائي المتولد من الفولتية المسلطة.

6- درجة الحرارة

تؤثر درجة الحرارة على الانهيار الكهربائي حيث انها في الانهيار النقي تؤثر على تفاعل الكترون – فوتون ففي درجات الحرارة المنخفضة ($T<<25^{\circ}C$) تكون تفاعلات الفوتون ضعيفة بحيث ان الالكترونات تربح طاقة اكبر في المجال الكهربائي وتكون قادرة على توليد العديد من الالكترونات الحرة الجديدة، وهكذا تكون فولتية الانهيار قليلة نسبياً. وتكون فولتية الانهيار اقصى ما يمكن في درجة حرارة الغرفة حيث تكون تفاعلات الفوتون مهمة ولكنها تقل تحت درجة حرارة الغرفة طالما بإمكان الاهتزاز الحراري ان يولد الكترونات جديدة وعلى العموم فأن متانة الانهيار النقية تعتمد اعتماداً قليلاً على درجة الحرارة.

اما في الانهيار الكهروحراري وهو الاكثر شيوعاً في العوازل السيراميكية فأن لتأثير درجة الحرارة تأثيراً واضحاً حيث ان اسباب الانهيار يمكن عزوها الى حرارة المحيط او خسائر التوصيل التي تولد حرارة بمعدل اسرع من معدل التخلص منها وازالتها مما يؤدي الى زيادة الحرارة الموضعية. واعتماداً على المادة وشكل التدرج الحراري وتركيب الغازات المتأتية والتوصيل المستمر المتزايد فأنه من الممكن ان تحدث كسور حول نقطة الحرارة الموضعية ويحصل الانهيار.

ولتجنب تجمع الحرارة والانهيار فأن الحرارة المتبددة يجب ان تساوي الحرارة المتولدة وكما هو واضح من العلاقات أعلاه فأن توليد الحرارة يعتمد على التردد (حيث ان النقصان في متانة العزل الكهربائي تكون في أقصاها عند ازدياد درجة الحرارة عند الترددات الواطئة).

وكذلك يعتمد على الفولتية والسعة ومعامل الفقدان العزلي وهذه العوامل ممكن معالجتها لتجنب حصول الانهيار الكهروحراري.

وبهذا فأن حجم، شكل، محيط انتقال الحرارة للأجسام السيراميكية يمكن استعمالها في تصميم المتسعات حيث تعتمد الحرارة المتبددة على حجم (مساحة المقطع) والتدرج الحراري ودرجة حرارة السطح.

وعموماً فأن متانة العزل الكهربائي تقل مع ازدياد درجة الحرارة.

7- المعدل الزمني لصعود الفولتية :

ان المعدل الزمني لصعود الفولتية يعد دالة لمتانة العزل الكهربائي في المواد الصلبة، حيث يحدد المعدل الزمني لصعود الفولتية نوع الانهيار الحاصل حيث يعد المدى (10^{-8} – 1 sec) هو المدى الذي يحدث فيه الانهيار الكهربائي النقي اما المدى (10^{3} min – 0.1) فهو المدى الذي يحدث فيه الانهيار الكهروحراري.

حيث ان تسليط الفولتية لوقت اطول يزيد من احتمالية حدوث الانهيار الكهروحراري. اذ ان سلوك الانهيار الكهروحراري يرتبط مع المعدل الزمني لصعود الفولتية التي يمكن ان تؤدي الى تسخين موضعي للمادة حيث ان فقدان الطاقة الكهربائية بمرور الزمن يؤدي الى رفع درجة الحرارة اكثر ويزيد التوصيلية الموضعية وهذا يسبب احداث قنوات من التيار، بالإضافة الى ذلك فأن المعدل الزمني لصعود الفولتية يمكن ان يسبب تأثيرات تراكمية للاصطدام (الكيميائي والكهروكيميائي) والتآكل والذي بدوره يحطم المواد ويسرع من الانهيار بواسطة التسخين. كما ان الزيادة في المعدل الزمني لصعود الفولتية يؤدي الى تقليل الزمن اللازم لحدوث اصطدامين متعاقبين لنفس الالكترون مما يؤدي الى سرعة في حدوث عملية التأين وبالتالي سرعة في الانهيار، ان عدم الاستقرارية الموضعية والتبخر الذي يحدث بسبب الزيادة الموضعية في درجة الحرارة يؤدي الى مرور تيارات عالية تؤدي بدورها الى ثقب العازل.

وقد وجد بأن للمعدل الزمني ودرجة الحرارة تأثيراً حرجاً على سلوك الانهيار لبعض السيراميكيات (الزجاجيات) حيث يعتمد على مميزات التوصيل وتبعاً لذلك التركيب، ففي درجات الحرارة المتوسطة تعتمد مواصفات الانهيار على المعدل الزمني للفولتية المسلطة.

اسئلة الفصل السابع

1- كيف يمكن التقليل من الانكماش في الابعاد نتيجة الحرق للمنتجات الخزفية الطينية.
2- وضح تأثير المسامية على كل من: الخصائص الميكانيكية، التوصيلية الحرارية، الاستقطاب الكهربائي، متانة العزل الكهربائي.
3- جسم سيراميكي كتلته وهو جاف 100 g وهو مشبع بالماء 110 g وهو معلق في الماء 80g أحسب: 1- المسامية الظاهرية 2-الكثافة الظاهرية 3- نسبة امتصاص الماء.
4- احسب الكثافة الحجمية (B.D.) لنموذج من الحراريات فيه المسامية10% ونسبة امتصاص الماء 3.5%.
5- ثلاث نماذج سيراميكية اسطوانية حسب المواصفات الامريكية (ASTM) قطرها 2cm اجريت عليها اختبارات (معامل الكسر الثلاثي، الانضغاط، الكسر الانفلاقي) وكانت اقصى قوة تحمل ميكانيكي(70 kn, 150 kn, 20 kn) على التوالي، احسب قيم الاختبارات الثلاثة اعلاه بوحداتMPa ، اذا كانت المسافة بين المسندين في اختبار معمل الكسر2 cm.
6- هل يتغير معامل التوصيل الحراري مع ارتفاع درجة حرارة المنتج السيراميكي وضح اجابتك.
7- اثبت ان العلاقة بين معامل الصدمة الحرارية السريعة R ومعامل الصدمة الحرارية البطيئة R' هي: $R'=K.R$ حيث:K معامل التوصيل الحراري.
8- قارن بين معاملات الصدمة الحرارية في حالة الاخماد السريع والبطيء لنموذج من الالومينا فيه مقاومة الانحناء 330 MPa ونسبة بوازون 0.21 ومعامل يونك 300 GPa ومعامل التمدد الحراري $7.4\times10^{-6}{}^{o}C^{-1}$ ومعامل التوصيل الحراري 26 W/m.^{o}C.
9- مادة من كاربيد السيليكون β-SiC فيها فجوة الطاقة 3.2 ev هل تعتبر مادة عازلة كهربائياً؟
10-وضح تأثير ارتفاع درجة حرارة المنتجات السيراميكية على كل من الخواص التالية: 1- الاستقطاب الكهربائي 2- ثابت العزل الكهربائي 3- الفقدان العزلي 4- متانة العزل الكهربائي.

11-أذكر ثلاثة امثلة لاستعمالات يومية للعوازل الكهربائية السيراميكية.

12-كيف يمكن الاستفادة من المواد البزوكهربائية السيراميكية في تطبيقات الاجهزة الكهربائية والمعدات.

13-نموذج من البورسلين العازل كهربائياً مقاومته النوعية $1011\ \Omega.m$ احسب ثابت العزل والفقدان العزلي الكهربائي اذا كانت زاوية الفقدان العزلي 2^o عند تردد $100\ kHz$.

14-أحسب متانة العزل الكهربائي لعازل سيراميكي من الالومينا اذا كانت اقصى فولتية انهيار عند سمك 1.2 هي $45\ kV$ واذا تضاعف السمك اصبحت اقصى فولتية انهيار $75\ kV$ فكم ستكون عندها متانة العزل الكهربائي؟ ناقش النتيجتين؟

تم بعونه تعالی