



Chem. Bilal A. Al-Rifaii

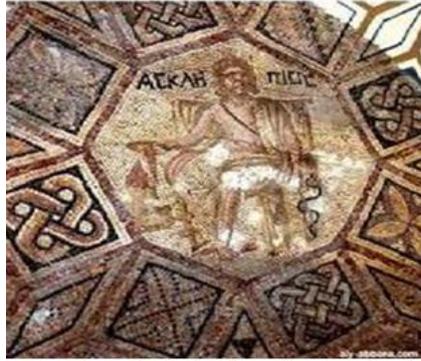
الكيميائي بلال عبد الوهاب الرفاعي

مدرّب التقنيات الصباغية في الاتحاد العربي للصناعات النسيجية وغرفتي صناعة دمشق وحلب
دمشق: هاتف: 011 3440538 ، حلب: 021 2262139 ، جوال: 0944 584316 ، b.rifatex@hotmail.com

صناعة الزجاج

1- تعريف: الزجاج مادة لابلورية صلبة هشة شفافة، ويعتبر الزجاج المصنوع من رمل السيليكا والصودا والحجر الكلسي والذي تدخل في تركيبه بعض الإضافات الأخرى من أكثر أنواع الزجاج شيوعاً عبر العصور، ويستخدم في صناعة النوافذ وأواني الشراب.
ويطلق مصطلح الزجاج علمياً على أي مادة صلبة تمتلك بنية لا بلورية، وتظهر تحولاً زجاجياً عند تسخينها لصهرها وتسييلها.

2- لمحة تاريخية: كان الخزف المزخرف، بمثابة أقدم نوع تم تصنيعه من الزجاج بصهر الرمل مع الصودا، واستخدم الخزف لصناعة الخرز والنقوش والحلي الصغيرة في العصور القديمة، وظهرت في الألف الثانية قبل الميلاد أول أوعية حقيقية من الزجاج، فقد تمكن الرومان من صب زجاج النوافذ، دون الوصول لصفاء كافٍ، ولم يزد استخدامه عن السماح بدخول الضوء، دون التعرض للظروف الجوية. وكان يُصبّ الزجاج على هيئة لوح مسطح، وقد تجرى عليه عملية درفلة لترقيق سماكته وهو ساخن، وعلى الرغم من وجود الزجاج في بعض الكنائس القديمة التي يرجع تاريخها إلى القرن السابع، إلا أن الألواح المتسعة من الزجاج الشفاف، لم تنتشر إلا في القرن السابع عشر.



لوحة مصنوعة من الخزف في العهد الروماني

3- إنتاج الألواح الزجاجية: تتضمن العمليات الأولى لإنتاج الألواح الزجاجية صب لوح من الزجاج ثم تمريره بين أسطوانتين لدرفلته وصقله، أو نفخ كرة من الزجاج، ومن ثم تدويرها في حركة مغزلية على طرف قضيب مع إسنادها على سطح أملس بارد حتى تنسطح على هيئة قرص أو تأخذ شكل الأسطوانة، وصقلها بواسطة اللهب وتنعيم سطحها. وتتم صناعة الأكواب بإدخال كرة الزجاج المصهورة في قالب وتدويرها فيه لتأخذ شكل القالب ثم تبرد، ومن ثم وبإزالة أحد طرفيها نحصل على الكأس المفتوح.

واحتاجت عمليات صناعة الزجاج القديمة لإطارات صغيرة تناسب مقاسات النوافذ الصغيرة، وظل بعضها محتفظاً بـ (عين الثور) المميزة في مركزها كعلامة متخلفة عن استخدام القضيب، أما العملية البديلة لإنتاج الزجاج المسطح العريض فاعتمدت على أرجحة الكرة حتى تتمدد وتتحول إلى شكل أسطواني، يصل طوله إلى ما يقارب المتر ونصف بقطر بحدود 45 سم. ثم تزال الأطراف وتشق الأسطوانة على طولها ليتم تسطيحها في فرن مناسب. وظلت الطريقة الأخيرة، مع طريقة أخرى متطورة عنها تعتمد على المكننة قيد الاستخدام حتى أوائل القرن العشرين، حين تم التوصل إلى طريقتين أخرتين هامتين:

3-1- طريقة فوركو وبسبرج: تعتمد طريقتا كلٍ من فوركو (عام 1904) وبسبرج (عام 1926) على سحب شريط من الزجاج رأسياً من فرن الزجاج، عبر فرن تليدين بواسطة درافيل من الاسبتوس المدارة بالمحركات، فتقوم بإسك الشريط من طرفه العلوي بمجرد برودته لدرجة كافية بعد عدة أقدام أعلى الفرن، وتسمح عملية التليدين بتبريد الزجاج ببطء بمعدل محدد، ويعد التبريد ببطء أمراً ضرورياً لتجنب الإجهادات الناشئة عن التبريد السطحي السريع، ويتميز الزجاج الناتج بشفافيته، وسطوحه المصقولة الصلبة، مع وجود بعض التشوه أو العيوب.

وكان يتم الحصول على الألواح الزجاجية المصقولة بدرفلة الزجاج المصهور من الفرن على هيئة شريط مستمر، ولكن كان يعيب ألواح الزجاج وجود ندبات على سطحه نتيجة التلامس بين الزجاج والدراfil. لذلك كان يتحتم إزالة هذه الندبات بالجلخ والصفل للحصول على سطحين متوازيين للوح الزجاج لتحقيق الاكتمال البصري (الخواص الضوئية الجيدة) للمنتج النهائي. وبالطبع، يتخلف عادم حدود 20% بسبب عمليات الجلخ والصفل، كما كان من الصعب تخليص الزجاج من الفقاعات الهوائية.

3-2- طريقة الطفو: منذ ظهور عملية الطفو على يد شركة (بيلكنجتون) البريطانية عام 1959 أصبحت الطريقة الأساسية المستخدمة في العالم أجمع لتصنيع الزجاج المسطح.

ويعتمد أسلوب الطفو على تحريك شريط من الزجاج بعرض يصل إلى 33 متراً لخارج فرن الصهر، ثم يتم تعويمه على سطح حمام (مغطس) من مصهور القصدير. ويُحتفظ بالشريط في جو يتم التحكم في تركيبه الكيميائي عند درجة حرارة مرتفعة لمدة زمنية كافية لاستواء سطح اللوح، وحتى يصبح السطحين مستويين ومتوازيين. ويتميز سطح الزجاج الناتج بالاستواء التام، نتيجة الاستواء المماثل لسطح حمام القصدير المنصهر. ويجري تبريد الشريط مع تحركه عبر حمام القصدير المنصهر حتى تتصلد السطوح بشكلٍ كافٍ، ودون أن تترك الدراfil ندبات على السطح السفلي للشريط، ويتميز الزجاج الناتج بهذه الطريقة بانتظام سماكته ولمعان سطوحه، ولا حاجة معه للجلخ أو الصفل.

وبعد مرور سبع سنوات من العمل المضني، وبعد 14 شهراً من التشغيل غير الناجح لمصنع أقيم بالحجم الصناعي الكامل ظهرت أول ألواح زجاجية ناجحة، تم تصنيعها بهذه الطريقة وبثخانة 6 ملم، وتحددت هذه السماكة بطريقة تلقائية نتيجة القوى الطبيعية المؤثرة على حمام الطفو، وهي ظاهرة حسنة، إذ يحتاج 50% من سوق الزجاج مرتفع الجودة إلى هذا السمك.

واقترضت الاستفادة الكاملة من طريقة الطفو السيطرة والتحكم في سماكة الشريط المنتج، وهو أمر أولته شركة (بيلكنجتون) اهتمامها، إلى أن تمكنت بعد عامين من ظهور هذه الطريقة من إنتاج زجاج بسماكة 3 ملم وتحقق ذلك عن طريق شد الشريط طولياً برفق، وبطريقة يتم التحكم فيها بحيث انتفى وجود أية تشوهات في الألواح الناتجة. ثم أمكن إنتاج ألواح أكثر سماكةً خلال السنوات الثلاث التالية بالحد من الاستطالة التي يتعرض لها الزجاج المصهور في حمام الطفو، حتى تتاح زيادة السماكة، وتبلغ السماكة المتوافرة حالياً (4-25) ملم من الزجاج المناسب لأغراض البناء، وسماكة 2.5 ملم لأغراض أخرى.

4- صناعة الزجاج عند المسلمين: اعتنى المسلمون في العصور الوسطى بصناعة الزجاج وطوروها بعد أن تعلموا طرق صناعتها من البلدان التي فتحوها مثل مصر والشام والعراق بلاد فارس، وكان ذلك لحاجتهم إلى الأواني الزجاجية المستخدمة في صناعة العطور والعقاقير والإنارة والشراب وغيرها.

وتمت صناعة الزجاج بصهر خليط من رمل السيليكا والبوتاس والصودا حتى تتحول إلى سائل وتمتزج جيداً. وعند تبريده إلى درجة ما يصبح مرناً سهل التشكيل. ويشكل الزجاج بواسطة أنبوبة حديدية طويلة ذات مبسم خشبي لحماية العامل من حرارة الأنبوب حيث يغمس في السائل ويرفع على طرفها قطعة من مصهور الزجاج، يقوم بنفخها فتتحول الكتلة الزجاجية إلى فقاعة صغيرة أولاً وتكبر مع استمرار النفخ. ثم تُشكّل حسبما يريد الصانع، فقد يصنع منها قارورة أو إبريقاً أو أسطوانة أو غير ذلك.

وكانت تنفذ الزخرفة بأساليب مختلفة، منها طريقة الضغط على الأواني وهي لينة، أو بطريقة الملقاط، أو بطريقة الإضافة، وتتم بلصق خيوط من الزجاج على جدران الأواني وهي لينة، أو لصق حامل من الزجاج اللين، وربما يكون ملوناً وغير ذلك من الطرق الأخرى.



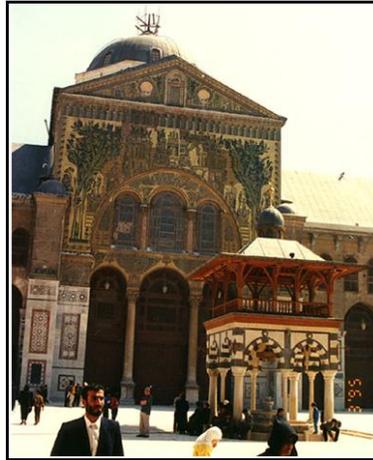
وصنع المسلمون القدامى أنواعاً كثيرة من الأواني الزجاجية؛ فبرعوا في صنع المشكاوات لإضاءة المساجد والمنازل وخلافه، وقد ورد ذكرها في القرآن الكريم: {اللَّهُ نُورُ السَّمَاوَاتِ وَالْأَرْضِ مِثْلُ نُورِهِ كَمِشْكَاةٍ فِيهَا مِصْبَاحٌ الْمِصْبَاحُ فِي زُجَاجَةٍ} [النور: 35].

واستخدم العرب المسلمون الزجاج في زخرفة النوافذ أيضاً؛ فبرعوا في صناعة الزجاج المعشق في الجص والتي تمر بعدة مراحل؛ فتبدأ برسم الوحدات الزخرفية على الجص، ثم مرحلة تفريغ الوحدات المراد تعشيقها بالزجاج. وأخيراً مرحلة تركيب القطع الزجاجية المختلفة الأحجام والألوان من الخلف وتثبيتها بالجص السائل.



الزجاج المعشق

وما زالت هذه الطريقة المتوارثة متبعة لتنفيذ لوحات زخرفية متنوعة الأشكال تُشع من الضوء حالة من البهجة والإبهار، ويبدو ذلك جلياً في نوافذ العمارات الإسلامية المختلفة، كما استخدمتها الكنائس المصرية أيضاً للترزين وصناعة النوافذ الجميلة الملونة، واستخدم المسلمون الزجاج في عمل زخارف الفسيفساء؛ ويظهر ذلك بوضوح في الجامع الأموي بدمشق الذي تضم زخارفه مناظر طبيعية بديعة، وتعتبر فسيفساء هذا المسجد أقدم نموذج للفسيفساء الزجاجية الإسلامية بعد قبة الصخرة.



واجهة الجامع الأموي بدمشق

5- بنية الزجاج: لزجاج السيليكا SiO_2 بنية لا بلورية، وبالتالي فإن التركيب الذري للزجاج لا يحتوي أي تناظر انتقالي، ولكن نظراً لخصائص الترابط الكيميائي فقد يمتلك الزجاج درجة ما من الانتظام قصير المدى نسبة إلى المضلعات الذرية الموضعية القريبة ولكنها لا تتواصل في الزجاج على المدى البعيد.

6- المواد الأولية في صناعة الزجاج: تدخل في صناعة الزجاج مجموعة من المواد والمركبات الكيميائية بقدر للحصول على النوع والخواص المطلوبين، ومن أهم هذه المواد إضافة لرمل السيلكا:

- 1- الحجر الكلسي: يستخدم عادةً على شكل أكسيد الكالسيوم والدولوميت.
- 2- أكسيد الرصاص: يعتبر من المكونات الرئيسية لأنواع الزجاج المتميزة بمعامل انكسار عالٍ للضوء، وعادة ما تشتمل على نسبة كبيرة من البوتاس (يعطي للزجاج بريقاً ولمعاناً وفي نفس الوقت مقاوم للكهرباء والحرارة).
- 3- أكسيد البور: يخفف لزوجة السيليكا دون أن يزيد من تمددها الحراري، ويحافظ على شفافية الزجاج بإضافة كميات بسيطة من أكسيد الألمنيوم، ويجعله أكثر مقاومة للحرارة (البائركس) المستخدمة في صناعة أدوات الطعام والمخابر الحرارية والأنابيب الصناعية لقدرتها على مقاومة التغيرات المفاجئة لدرجات الحرارة ومقاومتها للمواد الكيميائية.

4- أكسيد الألمنيوم والكلس: يستخدم هذا الخليط لصناعة الألياف الزجاجية بنسبة كبيرة في الزجاج مع 10% من أكسيد البور وقليل من القلويات.

ويمكننا الحصول على مختلف الخواص المطلوبة من الزجاج من خلال التحكم بتقنية العمليات الإنتاجية، ونوعية ونسب المكونات الداخلة في تركيبه، وبحيث يمكننا تشكيله أو سحبه على شكل خيوط رفيعة جداً يمكننا استخدامها في صناعة الألياف البصرية، أو يمكن أن يشكل من الحالة العجينية ويكسب مطواعية ليسكب في قالب تعطيه الشكل النهائي كمرآة التلسكوب التي يصل وزنها لعدة أطنان، ويمكننا زيادة صلابته أو قساوته ليصبح أقوى من الفولاذ وأكثر هشاشة من الورق مع إمكانية الحصول عليه بألوان وأشكال كثيرة.

7- أنواع الزجاج:

1-7 تصنيف الزجاج بحسب التركيب الكيميائي:

- 1- زجاج الصودا: ويشكل ما يزيد عن 90% من الزجاج المستخدم باحتوائه نسبة عالية من الصودا.
- 2- زجاج الكريستال الرصاصي: زجاج براق، عالي الكثافة وذو معامل انكسار عالي للضوء، يستخدم في صناعة التحف والإكسسوارات والثريا.

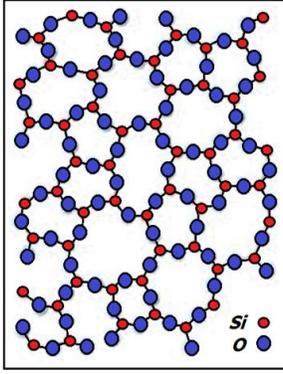
3- الكوارتز: يحتوي على السيليكا بنسبة 96%، ويتميز بمقاومته العالية للحرارة، مما يجعله مناسباً لصناعة موازين الحرارة العالية والأفران.

2-7 تصنيف الزجاج بحسب المعالجة الفيزيائية:

- 1- الزجاج العادي اللدن.
- 2- الزجاج المقسى: وتتم تقسيته برفع درجة حرارته ومن ثم تبريده بسرعة بتعرضه لتيارات باردة من الهواء، وبذلك يتميز عن الزجاج العادي بخاصتين أساسيتين:
- أ- يمكن للزجاج المقسى تحمل صدمات ميكانيكية أشد مما يتحمله الزجاج الملون العادي بـ 5 - 7 مرات. وعندما يتكسر الزجاج نتيجة صدمة شديدة، يتحول إلى عدد كبير من الشظايا الصغيرة التي لا تجرح ولا تؤذي أحداً (لهذا السبب يسمى هذا الزجاج زجاج أمان مقسى). وخلافاً للزجاج المقسى فإن الزجاج العادي يتناثر عند تكسره إلى شظايا حادة جارحة بالغة الضرر.

ب- يمكن للزجاج المقسى تحمل فروقاً كبيرة بين درجات الحرارة الداخلية والخارجية، تصل إلى 300 °م، في حين لا تتجاوز هذه الفروق 70 °م في الزجاج العادي اللدن، مما يعرضها للكسر مباشرةً.

ويحتوي زجاج الكوارتز على السيليكا بنسبة (96%) ويتميز بمقاومته للصدمات، إلا أنه مرتفع الثمن. ومن أهم خواص الزجاج الواجب ضمانها أثناء عمليات التصنيع لزوجته التي تعتمد على درجة الحرارة، لذا فإننا نواجه مع زجاج السيليكا النقي لزوجة عالية ما نحتاج معه لدرجات حرارة عالية جداً للتخلص من فقاعات الهواء التي قد يحتويها أثناء مختلف مراحل إنتاجه، ما يجعل من صناعة زجاج السيليكا النقي مكلفة جداً، لذا ولأسباب علمية يلزم إضعاف زجاج السيليكا لكي يسهل تصنيعه بشكل اقتصادي برفع نسبة أكاسيد المعادن القلوية فيه التي تعمل على خفض درجة حرارة الانصهار.



ويكمن السر في ذلك بأن كل ذرة سيليكون ترتبط بأربع ذرات فقط من الأوكسجين، وتسبب أي ذرات إضافية من الأوكسجين خلخلة التشكيل المتماسك والقوي والمكون من سيليكون - أكسجين - سيلكون، لذا أصبح من السهل تغيير تركيب زجاج السيليكا وجعله أكثر حركية باستخدام أكاسيد المعادن القلوية. وتعتبر أكاسيد المعادن القلوية من أهم عوامل الصهر المستخدمة في صناعة الزجاج، وأكثرها استخداماً الصودا التي تعتبر أرخصها ثمناً، واستخدمت أكاسيد معادن قلوية أخرى لهذا الغرض مثل (البوتاسيوم والليثيوم... الخ). وهناك أنواع من الزجاج تستخدم في الصناعات الميكروية كالزجاج الحساس للضوء.

8- أنواع الزجاج:

8-1- زجاج الرمل والصودا: بالرغم من استعمال الرمل بكميات تصل إلى مئات الأطنان سنوياً نجد أنواعاً من الزجاج لا يستعمل فيها مطلقاً، فزجاج الصودا والحجر الكلسي هو الزجاج المسطح الشائع الاستعمال، إذ تبلغ نسبة هذا الزجاج نحو 90% من إجمالي الزجاج المصنوع في العالم، كما أنه ما زال يصنع من نفس المواد التي كان يصنع منها منذ مئات السنين. وتبلغ نسبة رمل السيليكا في هذا الزجاج 72% مع 15% من أكسيد الصوديوم، و9% من أكسيد الكالسيوم و4% من مكونات ثانوية أخرى.

تطحن السيليكا المأخوذة من مصادر الحجارة الرملية لتتحول إلى رمل ناعم ويغسل جيداً. ويتم الحصول على معظم أكسيد الصوديوم من رماد الصودا، أما أكسيد الكالسيوم فغالباً ما يستحصل عليه من الحجر الكلسي أو الدولوميت، ويتميز زجاج الصودا والحجر الكلسي بكونه اقتصادي وسهل الصهر والتشكيل، ومقبول المتانة.



حجر الدولوميت

8-2- زجاج الرصاص والصودا: يطلق على زجاج الصودا والرصاص اسم زجاج الرصاص أو بلور الكريستال، ويصنع هذا الزجاج باستبدال أكسيد الكالسيوم بأكسيد الرصاص، وفي كثير من الأحيان عن جزء من السيليكا المستعملة في زجاج الحجر الكلسي، وزجاج الصودا والرصاص لين ناعم سهل الانصهار، وتكلفته أكثر بكثير من تكلفة زجاج الصودا والحجر الكلسي.

لزجاج الرصاص والصودا بعض الخواص البصرية القيمة، مما جعله يستعمل على نطاق واسع في زجاج المناضد الرائعة والمقننات الفنية. وبالإضافة إلى ذلك، فإن أكسيد الرصاص يحسن الخواص الكهربائية للزجاج.

8-3- زجاج البوروسليكات: زجاج مقاوم للصدمات الحرارية، ومعروف بأسمائه التجارية مثل البيركس والكيموكس. ويحتوي هذا الزجاج على 80% من السيليكا و4% فقط من القلويات و2% من الألمنيوم و13% تقريباً من أكسيد البور. وتبلغ مقاومته للصدمات الحرارية ثلاثة أضعاف زجاج الصودا والحجر الكلسي العادي، ويعتبر ممتازاً للأغراض الكيميائية والكهربائية، ويمكننا من إنتاج أوعية الخبز وخطوط الأنابيب الزجاجية. ويحتوي زجاج البيركس والكيموكس على:

تركيب زجاج البوروسليكات (البيركس)				
المكون	السيليكا	القلويات	الألمنيوم	أكسيد البور
النسبة المئوية	80%	4%	2%	13%

8-4- زجاج مصهور السليكا: لهذا الزجاج مقاومة عالية للصدمات الحرارية، ويتم اصطناعه بشكلٍ كاملٍ من السيليكا، ويتم رفع حرارته لدرجة عالية جداً، ثم يدخل في ماء بارد كالتلج دون أن يتصدع، وزجاج مصهور السيليكا

عالي التكلفة لأن درجات الحرارة المرتفعة جداً يجب أن تستمر طوال فترة إنتاجه، ويستعمل هذا الزجاج في المعدات الصناعية والألياف البصرية لمرشحات الموجات.

ويقوم زجاج الـ 96% سليكا الحرارة كما هي حال زجاج مصهور السليكا تقريباً، ولكنه أقل تكلفة في إنتاجه ويتكون هذا الزجاج من خليط خاص للبوروسليكا بعد أن يصنع بمسام عن طريقة معالجة كيميائية وتنكش المسام عندما يسخن الزجاج تاركة سطحاً شفافاً ناعماً.

8-5- الزجاج الملون: صنع قدماء المصريين زجاجاً ملوناً لستر بعض الشوائب التي كانت تختلط بالمادة الخام أحياناً. وكانوا يعرفون أنه بالإمكان الحصول على ألوان براقاً بإضافة بعض المكونات. ووجد الرومان أنه بالإمكان تحييد ألوان الشوائب بإضافة المنجنيز أو الإثمد (الأنثيمون)، وتضاف الآن بعض الأكاسيد إلى الزجاج لتلوينه. فقد وجد مثلاً أن جزءاً واحداً من أكسيد النيكل إلى 50.000 جزء زجاج ينتج عنه لون خفيف يتراوح بين الأصفر والبنفسجي اعتماداً على قاعدة الزجاج الأساسية، ويعطي جزء واحد من أكسيد الكوبالت إلى 10.000 جزء زجاج زرقة كثيفة.

ويصنع الذهب الأحمر بإضافة أكسيد الذهب أو النحاس أو السيلينيوم، كما يمكن الحصول على أنواع أخرى جميلة من الزجاج الملون بإضافة كيميائيات أخرى. ويمكن جمع قطع صغيرة من الزجاج الملون لتشكيل صوراً أو تصاميم زخرفية للنوافذ الملونة.

9- تقنية صناعة الزجاج: تختلف مصانع الزجاج اختلافاً كبيراً عن المصانع الأخرى. ففي مصانع الزجاج براميل ضخمة، وصوامع لحفظ المواد الخام الخاصة بصنع الزجاج وهي الرمل ورماد الصودا والحجر الكلسي والبوراكس. وجل هذه المواد مساحيق جافة يشبه بعضها بعضاً، ولكنها مع ذلك قادرة على إظهار نتائج مختلفة جداً.

أما منافذ التهوية الضخمة الموجودة في السقف، والمداخن الكبيرة، فإنها تطلق الحرارة الهائلة المطلوبة لصهر هذه المساحيق الجافة ولتجعل منها سائلاً ساخناً أبيضاً اللون، ويتم نصب الأفران في الطرف الحار من مصنع الزجاج.

9-1- الخلط: تصل المواد الخام الرئيسية إلى مصنع الزجاج في عربات للسكك الحديدية وتخزن في صوامع ضخمة، وبعد أن توزن وتخلط ألياً بالنسب الصحيحة تُضاف كسارة زجاج التي قد تكون زجاجاً يراد إعادة تصنيعه، أو نفايات زجاجية من انصهار سابق لنفس النوع من الزجاج، وتخفض إضافة كسارة الزجاج ما يعادل 5% إلى 40% من كمية الحرارة المطلوبة لصهر هذه الكمية الجديدة من المواد الخام. ومن ثم تنقل بعد الخلط لأفران الصهر في عربات أو سيور نقل مناسبة. وكان يتم فيما سبق صهر المواد الأولية في جرار طينية حرارية صغيرة، وتسخن عادة بالحطب، أما اليوم فهناك جراراً خاصة تكفي لكمية تزن إلى ما مقداره 1.400 كجم من الزجاج. وتسخن هذه الجرار بالغازات أو الزيت، ويمكن للفرن الواحد أن يتسع لعدد يتراوح بين 6 و20 جرة. وما زالت تصنع كميات قليلة من زجاج البصريات وزجاج الفنون والزجاج الفاخر في مثل هذه الجرار المقاومة للصهر.

ومن الطرق الشائعة لتصنيع الزجاج مزج كمية كبيرة من الرمل مع كميات قليلة من الكلس والصودا، ومن ثم تسخين المزيج لحرارة عالية، وبعدها تبدأ عملية التشكيل بطرق آلية أو يدوية، ويبرد للحصول على المنتج المطلوب.

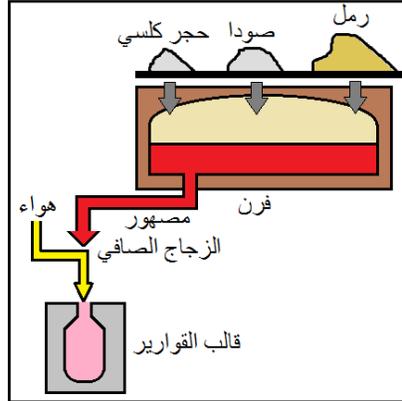
وتصنع الكميات من الزجاج في أفران يُطلق عليها اسم الخزانات، وترتفع فيها الحرارة إلى ما يزيد عن 1100 م حتى يصبح عجينة سائلة عالية اللزوجة، لأن العملية التي تتم فيها تستغرق عادة نحو 24 ساعة، ويملاً الخزان يومياً بالمواد الخام، ويستعمل كله قبل أن يملأ الفرن مرة ثانية، وتتسع هذه الخزانات اليومية لكمية تتراوح بين (1-35) طن متري من الزجاج.



ويصهر معظم الزجاج في أفران كبيرة تسمى الخزانات المستمرة. ويستطيع أكبر هذه الخزانات المستمرة أن تصهر ما بين (360-540) طن متري يومياً و 270 طناً مترياً من زجاج الأوعية يومياً. وتستخدم خزانات مستمرة

أصغر حجماً لإنتاج معظم منتجات الزجاج الأخرى، وتتم التغذية بالمواد الخام في ناحية التحميل بالسرعة التي يؤخذ فيها الزجاج المنصهر من الجهة التي يجري فيها العمل. ويستمر التحميل والصب والعملي منذ أن تشعل النيران أول مرة حتى يتم إطفائها في نهاية الفترة التي تسمى الحملة، التي تستمر عادةً لفترة قد تمتد إلى خمس سنوات. ويحدد طول فترة الحملة دائماً بتآكل جدران أفران الفرن الحراري بفعل حرارة مصهور الزجاج العالية.

9-2-2- تشكيل وتجهيز الزجاج: هناك أربع طرق رئيسية لتشكيل الزجاج وهي: النفخ والكبس والسحب والصب، وتأتي بعد عملية التشكيل عملية لاستعادة قوة الزجاج ومثاقته، كما يمكن استخدام طرق للتقوية وغيرها من الطرائق المؤدية إلى تجهيز الزجاج بالمتانة المطلوبة.



9-2-1- النفخ: يرجع تاريخ نفخ الزجاج دون استعمال قوالب إلى حوالي 2000 سنة. وتتم بغمس أنبوب نفخ من الحديد بطول (1.2-1.5 م) في مصهور الزجاج الذي يلتصق بعض منه بطرق الأنبوب الذي يكون شكله أشبه بالكمثرى، ليبدأ النفخ بلطف في الأنبوب حتى ينتفخ الزجاج ويتجاوب مع نفخ العامل الذي يقوم بإعطائه الشكل المطلوب، ويمكن للزجاج وهو في هذه المرحلة أن يعصر ويمط ويفتل ويقطع، ويقوم العامل بتسخين هذا الزجاج مرة بعد أخرى للحفاظ عليه طرياً مرناً، وعندما يصاغ الزجاج الساخن في شكله النهائي المطلوب، فإن هذا الشكل يكسر من طرف الأنبوبة الحديدية، وبالإمكان نفخ الزجاج في قوالب حديدية سواء باليد أو بالآلات:

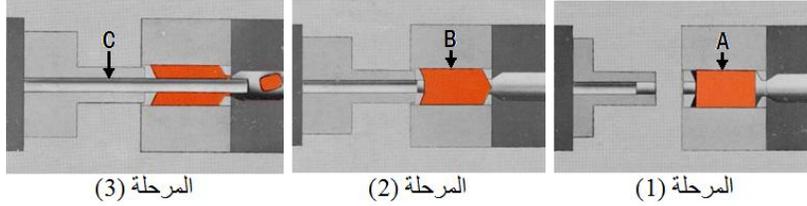


9-2-2- الكبس: يصحب الكبس إسقاط كتلة زجاجية ساخنة في قالب، ثم تكبس بمكبس حتى تنتشر كتلة الزجاج وتملأ جوف القالب، ولكي تكبس هذه الكتلة، يجب أن يتم تشكيل المادة بطريقة تمكن من سحب المكبس، وتستخدم عملية الكبس عادة في صنع أطباق الخبز والكتل الزجاجية والعدسات وصحون السجائر، وكما هي الحال في عملية النفخ، فإنه بالإمكان أيضاً إجراء عملية الكبس باليد أو الآلات سواءً بقالب مفرد أو مزدوج، وتستخدم آلات النفخ والكبس مجموعة من طرق الكبس والنفخ لصنع المادة المطلوبة. وهناك كثير من الأوعية التي تصنع بهذه الآلات.

9-2-3- السحب: تستخدم هذه الطريقة لتشكيل الزجاج المسطح وأنابيب الزجاج والألياف الزجاجية، وتكاد تكون جميع أنواع الزجاج المسطح المصنوع هذه الأيام زجاج طفو، ويشكل هذا النوع عن طريق سحب صحيفة عريضة من مصهور الزجاج في صهريج من القصدير المصهور، ويسمى هذا الصهريج الحمام الطافي لأن الزجاج يطفو في طبقة مستوية على سطح القصدير المنصهر البالغ النعومة، ويضبط التسخين في حمام الطفو بحيث تصهر أية خشونة قد تعلق بالزجاج، ولما كان الزجاج ينصهر بدرجة حرارة أعلى من تلك التي ينصهر عندها القصدير فإنه

بالإمكان نقله من القصدير المنصهر لمزيد من التبريد، وعندما يشكل الزجاج المسطح في حمام طفو، فإن كلا الجانبين يخرج بشكل لامع بحيث لا يحتاج للسفل والتهديب.

9-2-4- الأنابيب والألياف الزجاجية: تصنع الأنابيب الزجاجية بسحب مصهور الزجاج لينساب حول أسطوانة دوارة أو مخروط يسمى قلب التشكيل ينفخ الهواء من خلاله، لنحصل على أنبوبة مستمرة على الدوام، أو بسحبها بطريقة البثق، إذ توضع كتلة مسخنة في مكبس هيدروليكي قوي (1)، ويُدفع من خلاله شاقة صلب وتجبر باقي الكتلة على المرور من خلال القالب الأساسي وحول الشاقة. وفي عملية الخرق (2 و 3) تدور الكتلة المسخنة وتُغذى خلال سداة مسننة و تسحب قشرة الأنبوب للمقاس المطلوب من خلال مجموعة قوالب متتابعة:



أما الألياف الزجاجية فتصنع بسحب مصهور الزجاج من خلال ثقوب دقيقة جداً في قاع الفرن. **9-2-5- الصب:** صنعت المرأة بعرض 508 سم لتلسكوب مرصد بالومار في كاليفورنيا بالولايات الأمريكية بطريقة الصب، وتتضمن عملية الصب هذه ملء قوالب بزجاج منصهر وذلك إما بصب الزجاج من مغارف أو مباشرة من الفرن أو قاع الفرن.

ويستخدم الصب في إنتاج قطع الزجاج المستعمل في الشؤون المعمارية وزجاج الفنون وزجاج الليزر، وصناعة المصابيح، وهي طريقة لإعادة تشكيل الزجاج للحصول على أشكال جديدة بعد التبريد، ويقوم صناع المصابيح بإعادة تسخين أنواع مختلفة وأحجام متباينة من أنابيب الزجاج وقضبانها فوق شعلة نفخ يطلقها الغاز والأكسجين ليتمكنوا من ثنيها ولفها ومطها ولحمها وهي طرية إلى الأشكال المطلوبة. وبهذه الطريقة، فإنهم يصنعون أشكال حيوانات صغيرة ومزهريات وسفنًا شراعية، وعبوات زجاجية، ومعدات علمية وبعض قطع الأنابيب الإلكترونية والمصابيح المتوهجة وغيرها من المعدات الصناعية، وينتج عمال المصابيح الكثير من القطع الصغيرة للصناعات الكهربائية والكيميائية والطبية والألات ذات السرعات العالية الآلية بإعادة تصنيع الزجاج المطرى.

9-2-6- التلدين: ويُعرّف على أنه عملية إزالة آثار الشد والضغط المتبقية في الزجاج بعد تشكيله، وتلدين معظم الأدوات الزجاجية بمجرد الانتهاء من تشكيلها، وإذا لم تتم عملية التلدين، فقد يتحطم الزجاج بسبب الشد الذي يسببه التبريد غير المتوازن، وتتم عملية التلدين بتسخين الزجاج ثانيةً وتبريده ببطء بحسب جدول لدرجة الحرارة والزمن.

9-2-7- التطبيع: عملية يعاد فيها تسخين الأشكال الزجاجية التي صنعت حتى تصبح طرية تقريباً، ثم تبرد فجأة بتيارات قوية من الهواء البارد، أو بغمسها في زيت أو أي مواد كيميائية سائلة، ويرفع التطبيع من متانة الزجاج أكثر من الزجاج العادي، وعلاوة على ذلك، فإنه بالإمكان تطبيع المصنوعات الزجاجية بالكيميائيات.

9-2-8- الاختبار: يتولى مهندسو كل مصنع من مصانع الزجاج تقريباً اختبار عينات من المصنوعات الزجاجية المأخوذة مباشرة من الأفران للتأكد من جودة نوعية الزجاج وضمان خواصه المطلوبة، كما تؤخذ عينات من الأواني لاختبار حجمها وجودة متانتها وغير ذلك من الخواص الأخرى.

9-2-9- زخرفة الزجاج: هناك عدة عمليات تجهيز أولية يجب تطبيقها قبل زخرفة المصنوعات الزجاجية وتزيينها، فمثلاً، يجب إزالة الزجاج الزائد من الأواني المصنوعة بطريقة النفخ، وفي العمليات اليدوية، ويتوجب قطع الزجاج وهو ما زال طرياً، وتدار أحياناً القطعة الزجاجية أمام لهب ساخن جداً من الغاز. ويؤدي التمدد الفجائي لشريط الزجاج الساخن الضيق الذي يدور أمام اللهب إلى الانفصال عن الزجاج الأكثر برودة الذي يليه. وفي حالات أخرى، يمكن تثبيت الأنوية الزجاجية وهي مقلوبة، بل يمكن أيضاً استخدام لهيب أقوى، ثم يصهر الزجاج العالق بتعريضه لتلك الحرارة العالية، ويؤدي ثقل الزجاج المنصهر إلى انفصاله وسقوطه. ثم تجمع كسرة الزجاج هذه في برميل وتعاد للفرن لتستعمل مرة أخرى. ومن الممكن أيضاً فصل الزجاج الزائد بإزالة القطع الزجاجية بعجلة من الماس أو الحديد الصلب، ثم تجذب الزوائد الزجاجية بشيء من الضغط المفاجئ. فإن لم تكن الأجزاء الزائدة المقطوعة من الزجاج ناعمة بالقدر الكافي فإن بالإمكان صقلها بكاشطات ناعمة أو بلهيب آلة صقل نارية.

9-2-10- مضافات كيميائية: يعتبر حمض الهيدروفلوريك HF وبعض مركباته هي الكيميائيات الوحيدة التي تعمل على تآكل الزجاج وإذابته. ويسمى الزجاج الذي يغمس في هذه الكيميائيات أو يرش بها بأنه زجاج متآكل. وبناء على مكونات الزجاج وتركيز الفلوريد والمدة الزمنية التي يتعرض لها سطح الزجاج المتآكل يصبح خشناً إلى درجة تجعله يشبه الثلج ونصف شفاف، أو ربما كان له مظهر ناعم نصف شفاف بنعومة مظهر قماش الساتان. ويبطن داخل المصابيح الكهربائية بهذا الدهان الذي يشبه الساتان. كما تحفر الأباريق وأقداح الماء والزجاج المصنوع للأعمال الفنية في كثير من الأحيان بتصاميم معقدة. ويطلق على سطح المصباح أولاً بـحمض مقاوم للكيميائيات لوقاية أجزاء الزجاج التي تقع خارج قالب النموذج المطلوب. ثم يتآكل سطح الزجاج غير المطلي بفعل الحمض تاركاً النموذج. كما يمكننا خلط الهيدروفلوريك وحمض الكبريتيك.

9-2-11- الضرب بالرمل: يعطي الزجاج سطحاً نصف شفاف، وغالباً ما يكون السطح أكثر خشونة من ذلك الذي يتم الحصول عليه عن طريق الحفر. وينفخ الهواء المضغوط رمالاً بذررات خشنة ترتطم بالزجاج، وكثيراً ما يتم من خلال قالب زخرفي مطاطي يشكل تصميماً خاصاً. وكثيراً ما تكون البطاقات على أوعية الكيميائيات محكوكة بالرمل، وكثيراً ما تزخرف أواني الإضاءة والأفران والأطباق والنوافذ بضربها بالرمل.



الكربونوم Carbrundum

9-2-12- القطع: عملية تآكل كميات كبيرة من الزجاج الأصلي بتثبيتها على حجر رملي دوار أو عجلات الكربورندم Carbrundum وهي المادة الشديدة الصلابة التي تستعمل في الصقل والحك والكشط. ويتابع العامل شكلاً زخرفياً سبق أن وضع على الأنية أو الشكل. وقد يكون القطع أحياناً عميقاً جداً.

ويعاد البريق الأصلي للسطح الخشن المقطوع عن طريق التآكل بالأحماض أو بالصقل بكاشطات ناعمة جداً.

9-2-13- ابتكارات فنية: يسمح النقش بالعجلات النحاسية بالتعبير الكامل عن الابتكارات الفنية في الزجاج. وتصاغ التصاميم الرائعة الكثيرة التفاصيل المنجزة بحرص شديد في أشكال ثلاثية الأبعاد. وهناك الكثير من الأعمال الفنية التي نقشت على الزجاج. وتتضمن العملية المجهددة قطع الزجاج بعشرات من العجلات النحاسية التي تغذى بالمواد الكاشطة.

وتسمح الزخرفة بالمعالجة بالنار من وضع الطلاء الزجاجي الملون والأعمال ذات الرونق على الزجاج إما عن طريق الفن التشكيلي اليدوي (الرسم)، أو عن طريق نقل الصور من ورق أعد خصيصاً لهذه العملية أو الطباعة الحرارية.

وعندما تسخن هذه الوسائل الفنية من طلاءات وغيرها إلى درجة الحرارة المطلوبة فإنها تنصهر في الزجاج، وهكذا تصبح جزءاً من الأنية الزجاجية. وتزخرف كثير من الأكواب والجرار والأباريق وأجهزة الإنارة والتحف الفنية وغيرها من المنتجات بهذه الوسيلة

10- مراحل تصنيع المشغولات الزجاجية:

تكسير الزجاج المعاد التدوير بالكسارات الفكية
↓
طحن مكسرات الزجاج وإضافة: الرمل، الحجر الكلسي، الصودا آش، الدولوميت، الكيماويات المناسبة
↓
صهر المزيج بالأفران المناسبة
↓
نقل المصهور لآلات التشكيل
↓
فرن التبريد التدريجي
↓
التعبئة والتغليف

11- البرسبكس: يتم تحضير هذا الزجاج كبوليمير (بولي ميثيل ميثا كريلات)، ويطلق عليها تجارياً لوسايت أو بليكسي غلاس، ويتميز بالبليكسي غلاس بخواص بصرية ممتازة تلائم صناعة النظارات والعدسات وعدسات

الكاميرات. كما يستخدم في صناعة اللوحات الإعلانية، ويصنع منه زجاجاً شديداً التحمل للصدمات بحيث يصلح لتأمين السيارات.

12- زجاج الأمان: رافق التطور التقني وبشكل دائم ما يسمى بعوامل الأمان التي من شأنها حماية العمال والعمل بأن واحد، وأثبتت نتائج استخدامه مدى خطورته وبخاصة عند تحطمه إلى قطع كبيرة حادة الأطراف قادرة على الإيذاء عند الحوادث المفاجئة، لذلك كانت الغاية من زجاج الأمان خفض معدلات خطورة الزجاج بحيث يتحطم على شكل أجزاء صغيرة وناعمة غير حادة ومتلاصقة دون أن تنتثر في أرجاء مكان الحادث.

ويصنع زجاج الأمان بإحدى طريقتين، وضع طبقة لدائنيه " بلاستيكية " رقيقة بين لوحين زجاجيين، أو تقوية ألواح الزجاج عن طريق معالجتها بالحرارة. وكان الكيميائي الفرنسي إدوار بنديكتوس أول من صنع زجاج الأمان، بتركيبه عام 1909م رقاقة من السليولويد بين لوحين من الزجاج. واستخدم زجاج الأمان في الواجهات الواسعة التجارية وفي مجال واسع في عالم السيارات عندما كانت حوادث السير تحصد الكثير من الأرواح بسبب الزجاج.

أما عن قصة اكتشاف هذا النوع من الزجاج على يد الكيميائي الفرنسي إدوار بنديكتوس فقد وقعت منه بالخطأ زجاجة تحتوي على مادة الكولوديون المستعملة في تجميد الجروح وللتنصوير من فوق الرف إلى الأرض، ولاحظ العالم أن الزجاج قد تحطمت، ولكنها بقيت قطعة واحدة ولم تتفتت، فدهش للنتيجة، ولاحظ فضلاً عن ذلك أن مادة الكولوديون تركت بعد أن تبخرت قشرة رقيقة على الزجاج، هي التي أبقت ملتصقة ببعضه ببعض.

وقرأ هذا العالم فيما بعد أن عدداً كبيراً من الإصابات تحدث بسبب تطاير شظايا زجاج السيارات الأمامية عند أي اصطدام، وكانت السيارات وقتئذ في مستهل عهدها، فتذكر خطأه ومادة الكولوديون، فألفى فيها العلاج الناجع، ومد ذلك، ظهر إلى الوجود الزجاج الأمان، غير القابل للكسر والتحطيم.

13- الزجاج المعدني: أصبحت الحاجة إلى استخدام الزجاج المعدني في المحولات الكهربائية ومضارب الغولف وتطبيقات أخرى أمراً ملحاً، الأمر الذي دفع " تود هاف نايجل " الباحث الجامعي في جامعة جونز هوبكنز وأستاذ علم المواد والهندسة، إلى البحث عن تركيبية زجاج معدني جديد يتميز بالقوة والمرونة وخصائص مغناطيسية.

ويعرف علماء الزجاج إمكانية تحويل أي مادة من الحالة السائلة إلى الحالة الصلبة بدون أن تتبلور عبر معالجة حرارية معالجة خاصة، وتتعرض معظم المعادن عادة لعملية التبلور أثناء تبريدها وتنظم ذراتها لتشكّل نموذجاً عالي التنظيم يدعى شبكة بلورية. في حين أن الزجاج المعدني يتشكل خلال نفس العملية بصورة لا بلورية حيث تترتب بشكل عشوائي (يسمى الزجاج أحياناً بسائل صلب).

وبشكل مغاير للألواح الزجاجية، فالزجاج المعدني لا يكون شفافاً، لكن تكوينه يجعله يمتلك خصائص مغناطيسية وميكانيكية متميزة وصلابة عالية.

وذكر البروفسور هاف نايجل حول هذا الأمر: " إذا أردنا تصنيف المواد بحسب قابليتها للتحويل، نستطيع أن نقول بكل ثقة أنّ الزجاج المعدني لن يدخل ضمن هذا التصنيف. وتتميز المواد الزجاجية المعدنية بشكل كبير أكثر من أي مادة أخرى ".

ويحاول العلماء تركيب مادة زجاجية معدنية تحافظ على صلابتها دون أن تتبلور، ولكن بحيث تقاوم الحرارة العالية لاستخدامها في صناعة الآلات. وكان يهدف الغرض الأساسي للبحوث الجارية في المؤسسات الصناعية إلى مادة يمكن استخدامها في المقذوفات الانفجارية واختراق الدروع. وبطريقة مختلفة عن معظم المقذوفات البلورية المعدنية التي تتسطح على الهدف، ويرى هاف نايجل أن أطراف الزجاج المعدني لا تنتشر فوق الهدف، بل تبقى متماسكة فتكون ضربتها أكثر حدة.

ويضيف هاف نايجل: " ينظر إلى علم المعادن تقليدياً على أنه الفن الأسود، ومنذ زمن بعيد قام الناس بتركيب الأشياء بدون أن يعرفوا ماهية تركيبها، لذلك فإنّ علم المعادن يقدم مساهمة حقيقية تساعدنا على تصوّر عملية تكون الأشياء وكيف يمكن أن نجعلها تعمل بشكل أفضل ".

كما يقول أيضاً: " جزء مما نقوم به ما زال يدور في نطاق الكيمياء، وهو عملية مزج المواد لتحديد مدى فعاليتها للحصول على الزجاج المعدني، ويتضمن القسم الآخر من عملنا الطبيعة الفيزيائية، فنحن بحاجة لفهم آلية حصول عملية التبلور للوصول للمواصفات المطلوبة، لذا فإننا نحتاج إلى الكثير من البحث الأساسي على هذه المادة ".

ولأن الوصول لحالة التزجج يقتضي الحؤول دون التبلور، يستوجب أن تتميز هذه المواد مغناطيسياً وأن يتم تبريدها بسرعة بعد صبها بالقوالب، مما يجعلها مطلوبة بشكل كبير في عمليات التصنيع. مع ملاحظة أن عملية صبها في قوالب لتشكيل كتلاً كبيرة عملية في غاية الصعوبة، لأن معظم المعادن تميل إلى التبلور عندما تبريدها. ونحن بحاجة لأن يحدث التصلب قبل التبلور باتباع نظام تبريد يقصد تحويله إلى زجاج معدني.

وعلى سبيل المثال: إذا أردنا أن نصنع الزجاج المعدني من معدن نقي كالنحاس أو النيكل فعلياً أن نقوم بتبريد المعدن بنسبة تريليون درجة في الثانية، الأمر الذي يجعل هذه العملية مستحيلة بحسب ما قال هاف ناغل.

على أية حال، تعلم علماء علم المعادن في خمسينيات القرن العشرين كيفية إبطاء تبلور المعادن بمزج بعض المعادن مثل النيكل والزيرونيوم. وعندما تم تبريد الطبقة السطحية الرقيقة بمقدار مليون درجة في الثانية تمكنوا من الحصول على تركيب الزجاج المعدني لاستخدامها كشرائط رقيقة أو أسلاك أو مساحيق. أما في الوقت الراهن، فقد تمكن العلماء من تركيب حوالي 10 من المواد الزجاجية المعدنية على شكل أعمدة وكتل من خلال جمع أربع أو خمس عناصر ذات ذرات متنوعة الأحجام مع بعضها البعض، الأمر الذي يصعب عملية تبلور الشبكة في الخليط، وقد تم تسويق أحد هذه الكتل الزجاجية المعدنية لاستخدامها في صناعة رؤوس مضارب لعبة الغولف.

14- الزجاج النفوذ للضوء دون الحرارة: طور باحثان بريطانيان نوعاً من الزجاج يمنع نفوذ الحرارة دون أن يمنع نفاذ الضوء بإضافة مادة كيميائية للزجاج تتغير طبيعتها عند وصول الحرارة لدرجة معينة، وتحول دون نفاذ موجات الضوء في نطاق الأشعة تحت الحمراء، وهو النطاق الذي يؤدي إلى الشعور بالحرارة المصاحبة لضوء الشمس.

والمادة الكيميائية التي استعملها الباحثان إيفان باركن وتروي مانغ هي ثاني أكسيد الفاناديوم. وهي مادة تسمح - في ظروف الحرارة العادية - بنفاذ ضوء الشمس سواء في النطاق المنظور أو في نطاق الأشعة تحت الحمراء. ولكن عند درجة الحرارة الانتقالية (70° م) يحدث تغير لتلك المادة، بحيث تترتب إلكتروناتها على نمط مختلف، فتتحول من مادة شبه موصلة إلى معدن يمنع نفاذ الأشعة تحت الحمراء. وقد تمكن الباحثان من خفض درجة الحرارة الانتقالية لثاني أكسيد الفاناديوم إلى (29° م) بإضافة عنصر التنغستين.

وذكر الباحثان في مجلة " كيمياء المواد " أنهما قد توصلا لطريقة فعالة لإضافة ثاني أكسيد الفاناديوم للزجاج أثناء تصنيعه، ما يمكن من إنتاجه بتكلفة منخفضة. وباستخدام الزجاج الجديد ينتظر أن يتمكن الفرد من الاستمتاع بضوء وحرارة الشمس معاً إلى أن تصل حرارة الغرفة إلى (29° م)، وقتها سيعزل الزجاج الأشعة تحت الحمراء، بينما سيظل بالإمكان الاستفادة من الضوء المباشر للشمس بدلاً من الطرق التقليدية التي تمنع وصول كل من الضوء والحرارة مثل الستائر التي تغطي الشرفات والواجهات.

إن الزجاج الجديد سيحل مشكلة عvisية يواجهها المصممون المعماريون عند تصميم المباني ذات الواجهات الزجاجية، كما سيخفض تكاليف تكييف الهواء التي تبلغ ذروتها في صيفاً، ورغم وجود بعض المشاكل التقنية في طريق الإنتاج التجاري لذلك الزجاج مثل عدم ثبات مادة ثاني أكسيد الفاناديوم على الزجاج وكذلك اللون الأصفر القوي لتلك المادة، فقد ذكر الباحثان أنهما بصدد التغلب على مثل هذه المشاكل التقنية قريباً. وأوضح أنه لغايات تثبيت ثاني أكسيد الفاناديوم جيداً مع الزجاج ستضاف مادة ثاني أكسيد التيتانيوم. وسيضاف أحد صبغات لتحويل اللون الأصفر. وينتظر طرح الزجاج الجديد في المستقبل القريب.