

La superficie del vidrio*

II. Resistencia mecánica y pulido

PIEDAD DE LA CIERVA

Laboratorio y Taller de Investigación
del Estado Mayor de la Armada

LUISA ARROYO

Instituto Nacional de Electrónica

RESUMEN

Se presenta un resumen de las teorías modernas acerca de la resistencia mecánica del vidrio, deteniéndose especialmente en el estudio de las grietas superficiales, como medio de poner de manifiesto la debilidad mecánica del mismo.

También se exponen las teorías acerca del pulido del vidrio. El tema es muy de actualidad, pues aunque el proceso del pulido es utilizado desde muy antiguo en la tecnología del vidrio, presenta aún muchas lagunas en su aspecto teórico.

SUMMARY

A brief account is given on the modern theories on the mechanical properties of glass. Special mention is made of the surface crack patterns as a method of studying its mechanical weakness. The theories of glass polishing are also reviewed.

Much research effort is being devoted nowadays to achieve a better understanding of the general field presented in this paper. Although polishing is a well established process in the glass industry, its theoretical grounds are not yet well understood.

I. Resistencia mecánica del vidrio.

Cuando un sólido se somete a una tensión mecánica creciente, llega un momento en que falla experimentando una deformación permanente si es plástico, o sufriendo fractura si es frágil. El vidrio es un material frágil a la temperatura

* Este trabajo es parte de la tesis doctoral de L. Arroyo.

ambiente, es decir, la fractura se produce sin una deformación plástica previa. Dicha fractura se inicia normalmente en un punto de la superficie sometido a una tensión extensiva (1).

Es un hecho conocido desde hace muchos años que la resistencia a la fractura de las muestras de vidrio depende del estado de la superficie, clase y duración de la carga aplicada y de la atmósfera circundante. Cualquier deterioro de la superficie, tanto mecánico como químico, tiene gran influencia sobre las propiedades mecánicas del vidrio (2).

La resistencia mecánica del vidrio ha sido calculada por varios autores, los cuales obtienen valores del orden de 3×10^9 kg/m². Ahora bien, los resultados experimentales, que ofrecen una gran dispersión de valores, dan cifras de 10 a 100 veces inferiores. La explicación de esta discrepancia fue sugerida por Griffith (3), quien estableció las condiciones críticas necesarias para la propagación espontánea de grietas en los materiales frágiles.

La teoría de Griffith establece que este tipo de materiales falla bajo tensiones teóricamente bajas, porque contienen diminutas fisuras que los debilitan. Estas fisuras, conocidas como "grietas de Griffith", producen localmente elevadas concentraciones de la tensión mecánica aplicada. Del desarrollo de la teoría resulta para la carga de ruptura la expresión:

$$R = \sqrt{\frac{2E \alpha}{\pi c}}$$

donde E es el módulo de Young, α la energía superficial del vidrio y c la dimensión máxima (profundidad o longitud) de la grieta.

Aplicando esta expresión, la tensión crítica necesaria para producir la fractura tiene valores que concuerdan con la resistencia mecánica teórica. Según esto, la propagación de fracturas en una pieza de vidrio depende de la tensión mecánica a que está sujeta y de las dimensiones de las fisuras que existen en su superficie.

El mecanismo de la fractura del vidrio no está enteramente de acuerdo con las ideas formuladas por Griffith, si bien se aceptan sus principios básicos. Así no explica la fractura retardada bajo tensiones inferiores a la crítica (fatiga); además, en determinadas condiciones puede haber una propagación lenta de grietas, en la que influye la difusión de gases de la atmósfera y del propio vidrio.

Son numerosas las investigaciones sobre la influencia del medio ambiente en las propiedades mecánicas del vidrio. Baker y Preston atribuyen los fenómenos de fatiga a la acción química del vapor de agua y gases atmosféricos, absorbidos

en las fisuras de la superficie. El ataque se ejerce principalmente sobre los enlaces del vértice de las mismas, que por estar sometidos a la tensión máxima se rompen con más facilidad, lo que ocasiona la propagación de grietas; ahora bien, si la carga aplicada es débil, el ataque no se concentra en el vértice y la corrosión modifica las dimensiones de las fisuras, retardando la fractura. Esto ha sido confirmado por las recientes experiencias de Mould.

II. Agrietamientos superficiales.

Desde que Griffith postuló la existencia de diminutas grietas en el vidrio como causa de su debilidad mecánica, se ha intentado ponerlas de manifiesto por medio de tratamientos de la superficie. Es evidente, en ciertos casos, que ésta contiene fisuras, causadas por daño mecánico; pero otras veces la tensión de ruptura media supone dimensiones extraordinariamente pequeñas, no detectables por los medios de observación normales.

Andrade y Tsien, calentando muestras de vidrio a 350°C en presencia de vapor de sodio, señalaron la aparición de una red de grietas finas cuya densidad guardaba relación con la resistencia mecánica medida.

En los últimos años se han desarrollado varios métodos de producción de agrietamientos superficiales, con el fin de estudiar las propiedades de la superficie del vidrio. Así Levengood (4) ataca la superficie con una solución de fluoruro sódico y ácido clorhídrico, obteniendo agrietamientos que revelan fisuras previamente existentes. Gordon, Marsh y Parratt (5) emplean el ataque por vapor de sodio para estudiar varios tipos de vidrio, sometidos a diferentes tensiones mecánicas; los sistemas de grietas producidos ponen de manifiesto la clase de tensión a que está sujeta la superficie y guardan relación con la resistencia mecánica de las muestras.

Ernsberger (6) afirma que las grietas producidas por el método del sodio se forman al enfriar la muestra, debido a la diferencia de coeficiente de dilatación entre la capa superficial, rica en sodio y el vidrio no atacado. Para la detección de grietas de Griffith propone el tratamiento con una mezcla de sales de litio fundidas, a 200°C; las grietas se orientan de acuerdo con la distribución de tensiones existentes en la superficie.

En un trabajo reciente, Ernsberger aplica su método al estudio de las causas de debilidad mecánica en la superficie del vidrio e identifica tres tipos de imperfecciones de la misma: fisuras visibles que quedan después del pulido, abrasiones microscópicas y núcleos de devitrificación.

Acloque y colaboradores (7) producen también un cambio iónico en la superficie, por inmersión de las muestras en sales fundidas. La sustitución de los iones alcalinos o alcalino-térreos del vidrio por otros más pequeños, producen una contracción isotrópica de la capa atacada y cuando las tensiones extensivas originadas alcanzan un valor que sobrepasa la resistencia a la tracción, aparecen grietas que se orientan al azar si la superficie es homogénea y sin defectos. Si por el contrario, contiene grietas o abrasiones microscópicas, la resistencia mecánica es muy inferior en dichos puntos y en ellos se inician preferentemente las grietas. Por este método es posible también visualizar las tensiones que se establecen en la superficie de las muestras como consecuencia de los tratamientos de temple y recocido (fig. 1).

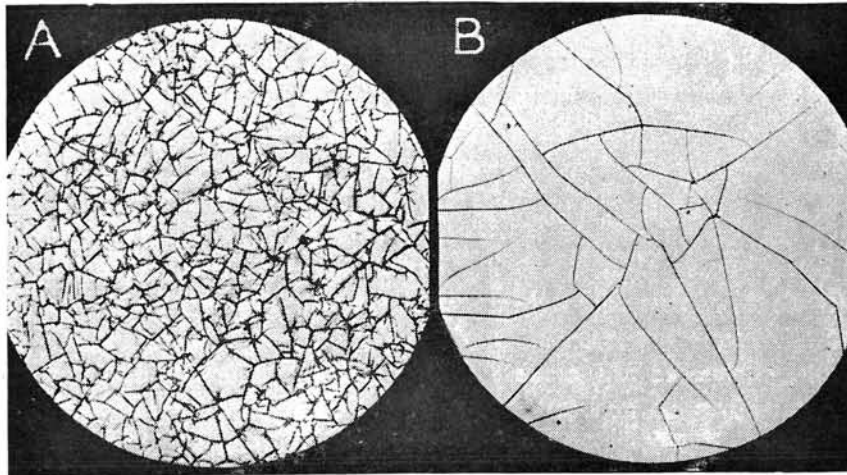


FIG. 1.—*Superficies de vidrio.*

A, recocido; B, templado y después recocido. Duración del tratamiento: seis horas.
Diámetro observado: 1 mm. (Según Acloque. Ref. 7.)

III. Superficies pulidas de vidrio.

1. Generalidades.

El pulido de las superficies de vidrio es conocido desde hace siglos y tiene por objeto eliminar las rugosidades de la superficie mate obtenida después del esmerilado.

Durante el esmerilado se aplican a la superficie tensiones intensas de cizalladura y compresión, haciendo rodar sobre ella los granos abrasivos por medio

de discos giratorios. El resultado es un rápido desgaste de la superficie, que se elimina en fragmentos hasta quedar allanada, con grietas cuya profundidad puede alcanzar unas 10 μ .

Una vez obtenida una superficie aproximadamente plana, se pasa al esmerilado fino, que se realiza en varias etapas con granos abrasivos de diámetro cada vez menor.

El pulido se puede realizar por tres procedimientos: al fuego, al ácido y mecánicamente.

En el pulido al fuego, los objetos afinados se calientan hasta lograr el reblandecimiento de la superficie, que queda brillante sin llegar a la deformación de las piezas.

El pulido al ácido se emplea especialmente en los vidrios de plomo. Las piezas se sumergen en una mezcla de ácidos fluorhídrico y sulfúrico; el primero corroe al vidrio y el fluoruro de plomo formado se transforma en sulfato, que se deposita en las partes más bajas de la superficie e impide un ataque ulterior de ésta. Así son eliminadas las partes salientes hasta quedar una superficie plana (8).

El pulido mecánico, aunque constituye una operación del dominio común en la tecnología del vidrio, presenta numerosas lagunas en su aspecto teórico. Primeramente fue considerado como una prolongación del esmerilado, es decir, una separación mecánica del material en las capas superficiales, causadas por un abrasivo de grano muy fino (pulidor). Sin embargo, a la luz de las ideas actuales sobre este proceso no se acepta esta explicación como única causa del mismo.

Como abrasivos para pulir se emplean generalmente los óxidos de hierro, de circonio y de cerio, que se aplican con un útil mecánico revestido de un material elástico (pañó, pez, etc.). El resultado depende de la naturaleza del esmerilado, composición, concentración y pH de la suspensión del pulidor en agua, y de la presión y velocidad del disco.

2. *Teorías sobre el proceso de pulido.*

La complejidad de los procesos que se desarrollan durante el pulido mecánico se pone de manifiesto en numerosas investigaciones, de las que expondremos brevemente las ideas fundamentales.

En 1901 Lord Rayleigh fue el primero en suponer que el pulido es distinto del esmerilado y que consiste en un fenómeno de naturaleza molecular, causado por fuerzas de adhesión entre el pulidor y la superficie, y no en un proceso mecánico de abrasión.

Posteriormente Beilby hizo progresar esta idea, afirmando que durante el pu-

lido se funden las irregularidades procedentes del esmerilado y dan lugar a una capa superficial en movimiento ("capa de Beilby"), resultando como consecuencia una superficie totalmente lisa. Esta hipótesis fue ganando terreno gracias a numerosos trabajos que demostraron que el vidrio puede ablandarse plásticamente bajo la presión de una punta dura tal como diamante, acero o vidia.

Frente a este criterio, otros autores afirman que las partículas pulidoras quedan fijas al disco y su acción se limita a cortar la superficie. A estas conclusiones llegó Koehler estudiando el proceso por métodos interferométricos (9).

Los estudios sistemáticos realizados con microscopio electrónico por Bruche y Poppa en los años 1956 a 1958 les llevan a admitir que las fuerzas ejercidas por los granos del pulidor son capaces de deformar plásticamente la superficie del vidrio y rellenar fisuras muy pequeñas por este proceso (10).

Además de estas dos teorías, existe un tercer aspecto, que es el de las reacciones químicas producidas en el curso del pulido. Este concepto ha sido desarrollado inicialmente por investigadores rusos y recientemente por Kaller, que considera el pulido como una complicada serie de reacciones entre el agua, la pez, el pulidor y la superficie del vidrio (11).

Según su teoría, la superficie se cubre con una capa de gel silícico al ponerse en contacto con la suspensión acuosa del pulidor. Los granos de éste se rompen por la fricción entre el disco y la superficie y una parte de los fragmentos, dotados de gran reactividad, se une a la superficie recién hidrolizada. El proceso continúa hasta quedar ésta igualada en escala molecular, sin que se produzca un flujo del vidrio.

Otros autores estudian igualmente los aspectos químico y físico-químico del pulido, a los que puede acompañar o no un flujo plástico del vidrio. Bourgeaux y Psychés (12) suponen que después de una fase abrasiva inicial, el proceso consiste en la combinación de una acción microabrasiva, que rompe enlaces que permanecen temporalmente sin saturar, y una combinación química pasajera del pulidor con los fragmentos de vidrio activados. La ruptura de enlaces Si—O sería definitiva por la intervención de las moléculas de ciertos pulidores, que por poseer varios grados de oxidación posibles podrían fijarse sobre el Si no saturado o fijar el O liberado.

Navez y Psychés (13) en una investigación muy reciente llegan a la conclusión de que el pulido consiste en tres fases, una abrasión pura, con nivelamiento rápido por arranque de las capas fisuradas durante el afinado, quedando aún fisuras de 5 a 6 μ de profundidad. Después, una fase abrasiva de baja eficacia, debida al pulidor. La tercera fase, verdadero pulido, consiste en la formación de una capa móvil, rica en sílice, que asegura el relleno parcial de los hoyos residuales, mientras continúa el nivelado por el segundo proceso.

3. *Rayas de pulido.*

Uno de los hechos más conocidos en relación con los vidrios pulidos mecánicamente es la aparición de rayas microscópicas en la superficie, cuando se ataca ésta ligeramente con ácido fluorhídrico. Beilby lo interpretó como una eliminación de la capa superficial que habría fluido y llenado los surcos del esmerilado. Más tarde, muchos autores observaron el mismo fenómeno y le dieron la misma interpretación.

Recientemente Rawstron (14) emitió la hipótesis de que el ataque con HF revela arañazos, no del esmeril, sino del pulidor. Según este autor, si la presión y temperatura son suficientemente altas durante el pulido, la acción del pulidor perturba la capa superficial del vidrio hasta cerca de 1.000 Å y la hace semejante a un líquido muy viscoso. Simultáneamente, al moverse algunas partículas duras del pulidor, pueden penetrar hasta la región del vidrio no perturbada y producir surcos que se rellenan rápidamente de vidrio superficial. Los arañazos pierden así su identidad en la capa móvil, pero son revelados cuando el ácido los disuelve y queda al descubierto la capa inferior del vidrio.

En contra de esta teoría, Brüche, Peter y Poppa (15) afirman que la aparición de rayas en las superficies atacadas con HF no se debe al descubrimiento de un arañazo relleno con vidrio fluido. Las experiencias les hacen concluir que bajo el arañazo producido por un grano de esmeril, existe en el vidrio una zona muy profunda de estructura perturbada (microtensada) que se ataca por el HF con mayor rapidez que el resto del vidrio.

BIBLIOGRAFIA

1. E. U. CONDON, "Physics of the glass state. Strength of glass", *Am. J. Phys.*, 22, 224 (1954).
2. R. E. MOULD, "Strength and static fatigue of abraded glass", *J. A. C. S.*, 43, 160 (1960).
3. A. A. GRIFFITH, "Phil. Trans. Roy. L. A.", 221, 163 (1920).
4. W. C. LEVENGOOD, "Experimental method for developing minute flaw patterns in glass", *J. Appl. Phys.*, 30, 378 (1959).
5. J. E. GORDON, D. M. MARSH, M. E. PARRATT, "On the strength and structure of glass", *Proc. Roy. Soc. Lond. A*, 249, 65 (1959).
6. F. M. ERNSBERGER, "On surface flaws in glass", *Phys. and Chem. of Glasses* (1960).
7. P. ACLOQUE, P. LECLERC, P. EHRMAMM, "Etude des surfaces de verre polies au moyen des échanges ioniques. Comp. R. Colloque sur la nature des surfaces vitreuses polies" (París, 1959), p. 43.
8. M. M. SKOMIAKOW, "Le polissage chimique des pieces en cristal", *Steklo i Keramica*, XV, 18 (1958). (*Verr. et Refrac.*, 1958, pág. 183.)
9. P. KOEHLER, "Multiple-beam fringes of equal chromatic order. Mechanism of polishing glass", *J. O. S. A.*, 43, 743 (1953).

10. E. BRÜCHE, H. POPPA, "Polieren von Glas", *Glastechn. Ber.*, 29, 183 (1956), íd. 30, 163 (1957), íd. 31, 341 (1958).
11. A. KALLER, "Zur Poliertheorie des Glases", *Silikattechnik*, 7, 380 (1956).
12. M. BOURGEAUX, I. PEYCHÉS, "Etude physico-chimique du polissage suivi de son etude micro-dynamique", *Coll. nature des surf. vitr. polies* (París, 1959), pág. 95.
13. M. NAVEZ, I. PEYCHÉS, "Experimental proof of flow during the processes of mechanical polishing". VI Int. Congress on Glass. Washington, 1962.
14. O. O. RAWSTRON, "The nature of polished glass surfaces", *J. Soc. Glass Tech.*, 42, 253 T (1958).
15. E. BRÜCHE, H. POPPA, K. PETER, "Kompression und Plastizität von Glas", *Glastechn. Ber.*, 31, 341 (1958).

