

# ПРЕЦИЗИОННОЕ ПРЕССОВАНИЕ СТЕКЛА – ВЫСОКОТОЧНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ СО СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ

О.Дамбон, д.т.н.,  
Olaf.Dambon@ipt.fraunhofer.de;  
Ю.Дуквен,

Julia.Dukwen@ipt.fraunhofer.de; <http://www.ipt.fraunhofer.de>  
Институт производственных технологий общества Фраунгофера, Германия

Прецизионное прессование стекла – новая технология для массового производства высокоточных оптических компонентов, выполненных из стекла и обладающих сложной геометрией. По сравнению с традиционным методом изготовления стеклянных компонентов с помощью шлифования и полирования технология прецизионного прессования стекла недорогая и обеспечивает высокие темпы производства.

Оптические компоненты из стекла имеют колоссальный спрос. Причина кроется в их многочисленном и разнообразном использовании. И спрос на подобные детали растет быстрыми темпами. Оптические компоненты из стекла применяются в лазерах, в измерительных инструментах и датчиках,

в технологических камерах и современных мобильных телефонах, а также в системах освещения. По сравнению с традиционным методом производства стеклянных компонентов методом шлифования и полирования новая технология прецизионного прессования стекла недорога и подходит для быстрого производства сложных высококачественных оптических компонентов из стекла в среднесерийном и массовом производстве.

Как правило, производство оптических компонентов из стекла происходит методом шлифования и полирования каждого оптического компонента. В зависимости от сложности геометрической формы оптического компонента, как например у асферических линз или линз с поверхностью произвольной формы, процесс производства может быть особенно затруднен. Обычно это приводит к росту цены на конечный продукт. Инновационный и мощный метод изготовления высококачественных оптических компонентов из стекла с помощью технологии прецизионного

прессования отличается быстротой и низкой стоимостью. Он подходит для средне- и крупносерийного производства.

Суть метода состоит в том, что стеклянные заготовки необходимого размера сначала нагревают до температуры прессования, а затем прессуют с помощью пресс-форм, придавая им заданную форму. Так, всего за один раз, без последующей обработки, производится стеклянная оптическая компонента. На рис. 1 показаны две стеклянные заготовки, лежащие в технологической камере.

Процесс прецизионного прессования требует однократного выполнения нескольких подготовительных шагов. Первый подготовительный шаг – это симуляция процесса прецизионного прессования. Симуляция проводится при требуемых параметрах температуры и давления и оптимизируется в соответствии с результатами. Следующий подготовительный шаг – это изготовление пресс-форм. При симуляции рассчитывается усадка стекла в процессе прессования, что учитывается



Рис.1. Две стеклянные заготовки на прессформах в технологической камере

при изготовлении пресс-формы. Для защиты от преждевременного износа пресс-формы покрываются износостойким покрытием. Последний шаг процесса – это репликативное изготовление оптических компонентов для собственного производства.

### СИМУЛЯЦИЯ ПРОЦЕССА

Симуляция процесса прессования служит для облегчения конструирования пресс-форм и определения технологических параметров изделия. В ее основе лежит метод конечных элементов. Коэффициенты теплового расширения материала пресс-форм и стекла, как правило, различны. Поэтому при охлаждении форма стекла и пресс-формы отличаются друг от друга, что называется усадкой стекла. Также надо учесть, что при охлаждении стекла в нем возникают механические напряжения. Это связано с разными скоростями охлаждения материала внутри и на поверхности оптического компонента. Механические напряжения вызывают в свою очередь неоднородное распределение показателя преломления в линзе, что приводит к искажению изображения оптического компонента и определяет качество готового изделия. При наличии достаточных априорных данных об используемом материале программа позволяет промоделировать площадь контакта между стеклом и пресс-формой (рис.2), а также рассчитать распределение температурных полей и механических напряжений в стекле и материале прессформы в течение процесса прессования.

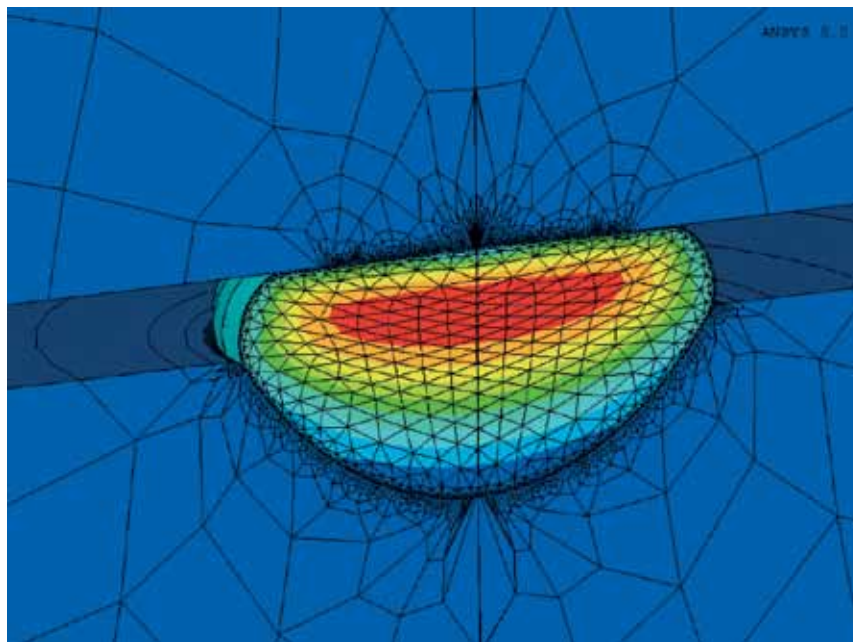


Рис.2. Симуляция процесса прецизионного прессования би-асферической линзы

С помощью симуляции процесса и полученной информации постоянно моделируются параметры прессформы и параметры процесса. За это время они постоянно изменяются до тех пор, пока не достигаются требуемая точность формы и качество изображения оптического компонента. Симуляция позволяет свести к минимуму дорогостоящие и долговременные эксперименты для определения лучшей геометрической формы прессформы и оптимальных параметров процесса.

### ПРЕСС-ФОРМЫ

При прецизионном прессовании качество поверхности оптического компонента, как правило, не может быть лучше, чем качество поверхности прессформы.

Поэтому к точности формы и качеству поверхности прессформ предъявляются высокие требования. Пресс-формы с высоким качеством поверхностей изготавливают из плотных и мелкозернистых материалов с помощью высокоточных машин с ЧПУ. Выкрошивание зерен мало влияет на качество поверхности у мелкозернистых материалов. Так как оптические компоненты изготавливаются при

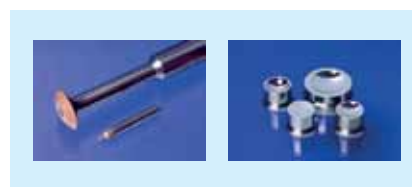


Рис.3. Алмазные шлифовальные круги и готовые пресс-формы

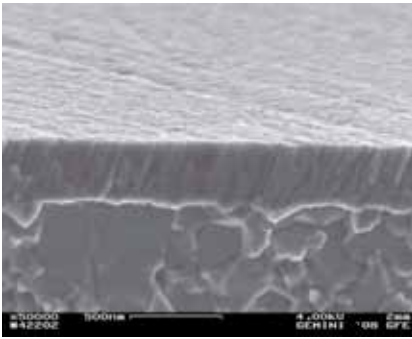


Рис. 4. Поверхность пресс-формы, покрытая платинистым иридием

давлении в несколько кН, пресс-формы производятся из очень твердых материалов.

Для прецизионного прессования оптических компонентов из стекла мелкозернистый и почти не содержащий связующего карбид вольфрама STN01L компании CERATIZIT является наилучшим материалом для пресс-форм. Этот материал имеет плотность 15,57 г/см<sup>2</sup> и твердость 2825 HV10. Размер зерен составляет несколько нанометров. STN01L состоит более чем из 99% карбида вольфрама и менее чем из 1% других элементов, находящихся в материале в качестве связующих.

Так как пресс-формы состоят из твердого и хрупкого материала, они производятся исключительно способом дуктильного ультрапрецизионного шлифования. При ультрапрецизионном шлифовании такого твердого и хрупкого материала, как STN01L, используются алмазные мелкозернистые шлифовальные круги на металлической связке. На рис. 3 показаны два алмазных шлифовальных круга, которые предназначены для изготовления пресс-форм, а также готовые пресс-формы.

## ИЗНОСОСТОЙКОЕ ПОКРЫТИЕ

Для защиты от преждевременного износа на пресс-формы наносится износостойкое покрытие. К износостойким покрытиям предъявляются высокие требования. Так как процесс прецизионного прессования происходит при высоком давлении, защитный слой должен быть достаточно твердым,

чтобы обеспечить точность формы производимых оптических компонентов. Покрытие также должно быть термостойким, то есть при процессе прессования не расплавляться и не изменяться химически. Как защитный слой, износостойкое покрытие не должно взаимодействовать со стеклом, которое прессуется. Кроме того, покрытие должно иметь высокое качество поверхности для изготовления оптических компонентов из стекла с низкой шероховатостью.

Из других областей применения известны износостойкие покрытия, такие как TiAlN, AlCrN или DLC. Для прецизионного прессования на сегодняшний день покрытие из платинистого иридия (PtIr) оказывается лучшим покрытием от износа. На рис. 5 показана РЭМ-фотография пресс-форм с покрытием платинистого иридия. Платинистый иридий напыляется в процессе PVD и имеет высококачественные поверхности. Он также инертен и достаточно тверд. Это позволяет сделать изготовление высококачественных оптических компонентов методом прецизионного прессования экономически выгодным производством. Толщина покрытия

лежит в нанометровом диапазоне (300–400 нм) и не влияет на форму и качество поверхности пресс-форм.

## ПРОЦЕСС ПРЕЦИЗИОННОГО ПРЕССОВАНИЯ

Процесс прецизионного прессования начинается с вакуумирования технологической камеры. Эта операция служит для минимизации взаимодействий между стеклом и материалом пресс-формы с атмосферой камеры. Кислород и другие элементы, присутствующие в окружающей среде технологической камеры, в экстремальных условиях взаимодействуют со стеклом или материалом пресс-форм. Таким образом, они негативно влияют на процесс прессования, поэтому и удаляются из технологической камеры. Нагрев стекла вместе с пресс-формами происходит с помощью инфракрасного излучения (рис. 5). Во время нагревания до температуры прессования технологическая камера наполняется азотом для быстрого нагревания за счет конвекции. Температура прессования выбирается так, чтобы, с одной стороны, стекло не было сильно вязким и хорошо прессовалось, а с другой стороны – оставалось достаточно вязким и не прилипло

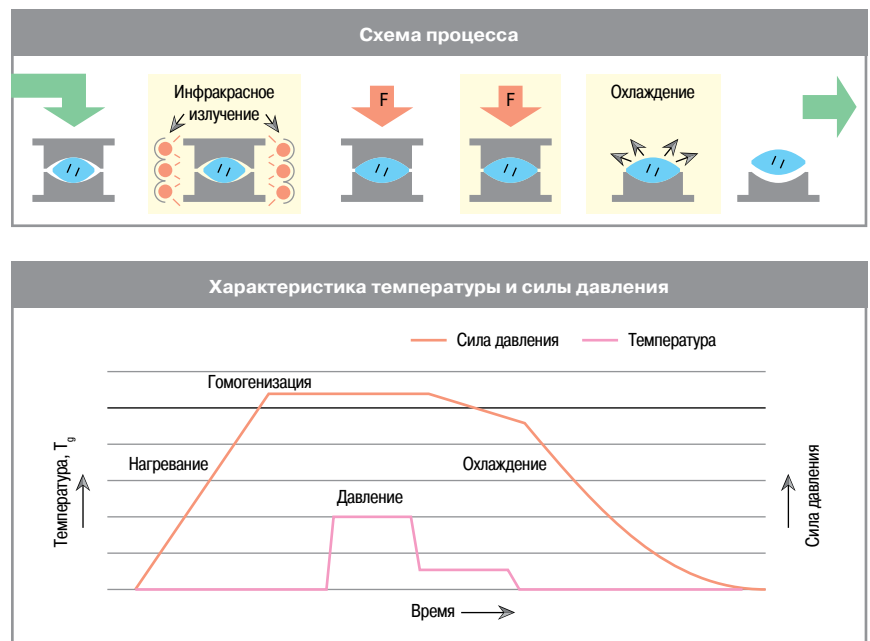


Рис. 5. Схема процесса и характеристика температуры и давления в процессе покрытия платинистым иридием



к пресс-форме. Для выбора правильной температуры учитывается вязкость стекла, которая зависит от температуры. Опыт показал, что стекло легко прессуется при вязкости между  $10^7$  дПа·с и  $10^{10}$  дПа·с. Типичные температуры прессования зависят от типа стекла и лежат в диапазоне от 400 до 700°C. После достижения температуры прессования следует короткое время гомогенизации для достижения равномерной температуры в пресс-формах и стекле. После фазы гомогенизации следует процесс прессования. Давление также зависит от типа стекла и лежит в диапазоне от 2 до 10 кН. Сам процесс прессования происходит в вакууме, чтобы избежать возможных включений азота между стеклом и пресс-формой и изменений в поверхности стеклянного оптического компонента. После прессования оптический компонент и пресс-форма охлаждаются под контролем при низком давлении до температуры ниже температуры трансформации  $T_g$ , а затем быстро охлаждаются азотом. Контролируемое охлаждение при низком давлении предотвращает деформацию стекла обратно в свою первоначальную форму. Весь процесс длится 15–25 минут в зависимости от формы и размера оптического компонента.

#### СТЕКЛА LOW-TG

Не каждый тип стекла прессуется с помощью технологии прецизионного прессования одним и тем же образом. Температура процесса прессования связана с определенной вязкостью стекла. Различный химический состав стекол приводит к тому, что определенная вязкость стекла достигается при разных температурах. Склонность к слипанию стекла с пресс-формами увеличивается с ростом температуры процесса. В связи с этим выгодно прессовать стекло при более низких температурах. По этой причине известные производители стекла разработали специальные его сорта для прецизионного прессования. У так называемых Low-Tg

стекла температура трансформации лежит ниже чем 550°C и поэтому такие стекла прессуются при соответственно низких температурах. Низкотемпературные процессы положительно влияют на пресс-формы, увеличивая их срок службы. Кроме того, Low-Tg стекла расположены по всей диаграмме Аббе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Dambon.O., Wang. F., Klocke. F. et al.** Efficient mold manufacturing for precision glass molding. – J. Vac. Sci. Technol. B, 27(3), 2009.
2. **Yi A., Jain A.** Compression molding of aspherical lenses – a combined experimental and numerical analysis. – J. Am. Ceram. Soc., 2005, 88 [3], p. 579.
3. **Yi A., Chen Y., Klocke F. et al.** A high volume precision compression molding process of glass diffractive optics by use of a micromachined fused silica wafer mold and low Tg optical glass. – J. Micromech. Microeng. 2006, 16, p. 2000.
4. **Yi A., Huang C., Klocke F. et al.** Development of a compression molding process for three-dimensional tailored free-form glass optics. – Applied Optics, 2006, v. 45, №. 25, p. 6511., September.
5. **Fischbach K., Georgiadis K., Wang F. et al.** Investigation of the

effects of process parameters on the glass-to-mold sticking force during precision glass molding. – Surface & Coatings Technology, 2010, 205, p 312.

6. **Rieser D., Spie G., Manns P.** Investigations on glass-to-mold sticking in the hot forming process. – Journal of Non-Crystalline Solids 2007, 354, p. 1393.
7. **Firestone G. and Yi A.** Precision compression molding of glass microlenses and microlens arrays – an experimental study. – Applied Optics, 2005, v. 44, p. 6115.
8. **Wang F., Chen Y., Klocke F. et al.** Numerical Simulation Assisted Curve Compensation in Compression Molding of High Precision Aspherical Glass Lenses. – Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2009, v. 131, p.011014.
9. **Chen Y., Yi A., Su L. et al.** Numerical Simulation and Experimental Study of Residual Stresses in Compression Molding of Precision Glass Optical Components. – Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2008, v. 130, p. 051012.
10. **Su L., Chen Y., Yi A. et al.** Refractive index variation in compression molding of precision glass optical components. – Applied Optics, 2008, v. 47, Mar., p. 1662.