

Повышение долговечности деталей формокомплектов

П. А. Тополянский,
к.т.н., генеральный директор,
НПФ «Плазмацентр» (Санкт-Петербург)

Выход из строя подавляющей части деталей формокомплектов стеклоформирующих машин, как и многих других деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки, связан с износом и разрушением их поверхностных слоев. Такой характер разрушений обусловлен превышением эксплуатационных напряжений над прочностными свойствами основного материала в определенных поверхностных зонах деталей. Очевидно, поверхностные слои деталей при эксплуатации нагружены более интенсивно, чем их внутренние части. Рабочие напряжения имеют максимальные значения на поверхности и уменьшаются по сечению детали. Напряжения в поверхностных слоях дополнительно могут увеличиваться за счет наличия многочисленных концентраторов напряжений и дефектов поверхностного слоя, неравномерности действия контактно-динамического нагружения, неоднородности напряженно-деформированного и теплового состояния поверхности, структуры поверхностного слоя.

Поэтому очевидно, что в целях повышения долговечности и борьбы против износа различных деталей во многих случаях достаточно произвести упрочнение именно поверхностного слоя. Остается только ответить на вопросы, связанные с выбором технологии упрочнения, толщины упрочненного поверхностного слоя и критериями упрочнения, которые необходимо закладывать в процессе конструирования деталей.

Под термином «поверхность» в данном случае понимается геометрическое место точек обрыва кристаллической решетки материала детали, где образуется нескомпенсированность связей между атомами, возрастает дефектность кристаллического строения, происходит снижение структурной стабильности. По этой причине

поверхность твердого тела обладает некоторой избыточной энергией, которая обуславливает способность поверхностей к взаимодействию с окружающей средой (в том числе и со смазкой), которое получило название адсорбции и приводит к формированию граничных слоев.

За счет адсорбционной активности поверхностей на них образуется тонкий граничный слой, отличающийся по свойствам и структуре от поверхностного (переходного) слоя твердого тела. Поперечный разрез твердого тела схематически может быть представлен в виде некоторой слоистой системы (рис. 1). Она состоит из адсорбционного, переходного и деформированного слоев, расположенных над твердой (объемной) фазой основного материала. При этом толщина измененного поверхностного слоя составляет: $A_1 + A_2$ – порядка 1 – 100 нм, A_3 – 10^{-3} – 1 мкм, P – 0,01 – 0,1 мм. Наличие подобной слоистой структуры и знание ее свойств определяют дополнительные требования, связанные с модификацией поверхностного слоя. Для одних тех-

нологий упрочнения необходимо снимать эти слои, добиваясь до чистой металлической основы (например, для увеличения адгезии при использовании вакуумных технологий нанесения износостойких покрытий), для других – снятие этих слоев является не принципиальным (например, для процессов газопламенной или плазменной наплавки, финишного плазменного упрочнения).

Важно отметить, что любая деталь после изготовления традиционными методами обладает неравномерными свойствами поверхностного слоя за счет как образования многочисленных дефектов, так и неоднородности физико-химических свойств исходного материала. Так, в результате механической обработки на поверхности имеют место: различная шероховатость, неравномерность степени наклепа и толщины наклепанного слоя (обычно из-за сложности конфигурации деталей), могут возникать остаточные напряжения растяжения.

В большинстве случаев детали, работающие на трение и износ, проходят объемную термическую обра-

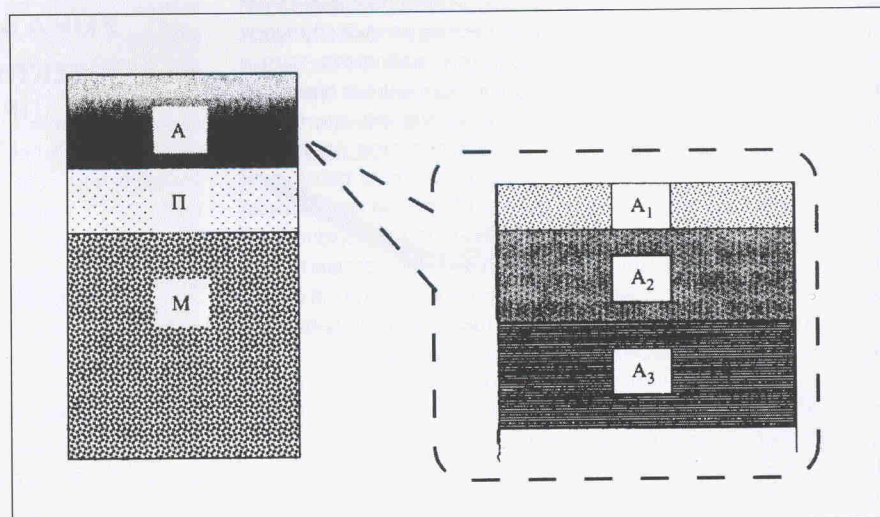


Рис. 1. Поперечный разрез твердого тела от поверхности вглубь металла
A – адсорбционный слой; P – переходный слой; M – металл; A_1 – слой адсорбированной влаги и полярных молекул органических веществ; A_2 – слой адсорбированного газа; A_3 – слой окислов металла

ботку. При этом различие в структуре и свойствах поверхностного слоя и сердцевины детали проявляется за счет окисления поверхности и уменьшения концентрации углерода, неравномерности температурного нагрева и охлаждения. Результатом этого может явиться изменение характеристик поверхностного слоя. В существенно меньшей степени окисление и обезуглероживание происходят при использовании термической обработки в защитной контролируемой атмосфере, хотя эта технология используется значительно реже. Как показывает практика, любая объемная термическая обработка в большинстве случаев не обеспечивает равномерность свойств на поверхности и в объеме детали.

Химико-термическая обработка (ХТО) позволяет в результате поверхностного диффузионного насыщения углеродом, азотом и другими элементами и последующей (или предыдущей) термической обработки обеспечить формирование в поверхностном слое более прочных и стабильных фаз и структур. Такое изменение свойств поверхности компенсирует энергетическое и структурное состояние детали в целом и обеспечивает их повышенную износостойкость. При этом все же имеет место разброс в долговечности упрочненных ХТО деталей, достигающий 10 раз и более. Это также объясняется неоднородностью свойств поверхностного слоя после ХТО.

В последнее десятилетие возникло новое направление в науке – инженерия поверхности, связанное с методами обработки поверхности, модифицированием поверхностных слоев, нанесением функциональных покрытий, исследованием физико-механических и эксплуатационных свойств поверхностных слоев.

Изготовление надежной, износостойкой и соответственно конкурентоспособной продукции с учетом знаний основ инженерии поверхности связано с разработкой и применением методов целенаправленного конструирования композиционного строения материалов, состоящих из поверхностного слоя и сердцевины. При этом повышение износостойкости различных деталей может быть достигнуто за счет комплексного инженерного подхода, связывающего в единую систему конструкторские и технологические требования.

При разработке технологии упрочнения применительно к деталям формокомплектов стеклоформирующих машин прежде всего необходимо определить условия их эксплуатации.

Формовая оснастка стеклоформирующих машин (черновая и чистовая формы, горловое кольцо, поддон чистовой формы, плунжер, воронка, донный затвор, плунжерное кольцо) предназначена для формования стеклоизделий и работает в непосредственном контакте с жидким стеклом. Детали формокомплектов при эксплуатации находятся в сложном напряженном состоянии под воздействием статических и динамических нагрузок, вибраций, термоциклических нагрузок, контакта и течения технической смазки и, наконец, расплавленной стеклянной массы. Температура стекломассы при формовании достигает 1 050 – 1 250 °С, период формования – несколько секунд, средняя скорость работы стеклоформирующей машины составляет 60 – 140 капель в минуту.

Материал деталей формокомплектов выбирается с учетом метода изготовления, типа стекла и планируемого тиража выпуска стеклянных изделий. В большинстве случаев используются отливки из серого и высокопрочного чугуна (например, СЧ 20, ВЧ 70), бронзы, хромоникелевых сталей (например, сталь 20Х18Н9Т), поковки из стали 45.

При выработке стеклоизделий на рабочую поверхность форм наносится техническая смазка различных отечественных и иностранных произ-

водителей. Назначение смазки – избежать прямого контакта стекломассы с металлом формы, обеспечить оптимальное скольжение стекломассы при формовании, защитить поверхность форм от агрессивного воздействия стекломассы, создать гладкую, непрерывную, с высокой степенью сцепления графитовую пленку, которая обеспечит хорошую загрузку и выемку, уменьшит остаточные следы и трещины на изделиях. Без смазки стекломасса может прилипнуть к форме, при этом создаются условия для образования посечек и других дефектов. При низком качестве изготовления форм и неэффективном выборе смазки заграфичиваются элементы форм (особенно в месте посадки горлового кольца на пуансон), следы нагара могут переноситься на изделие, возможно неравномерное растекание смазки.

В случае пригара смазки, налипания стекломассы, обнаружения следов нагара производится чистка деталей стеклоформ, которая наряду с естественным износом дополнительно способствует изменению их геометрических размеров.

Основными дефектами формования являются: кривизна изделий, несимметричная приставка деталей, разнотолщинность стенки, складки, морщины, царапины, мелкие трещины (посечки) и др. Причиной появления многих из этих дефектов является состояние поверхностного формирующего слоя деталей формокомплектов. Основным потребителем

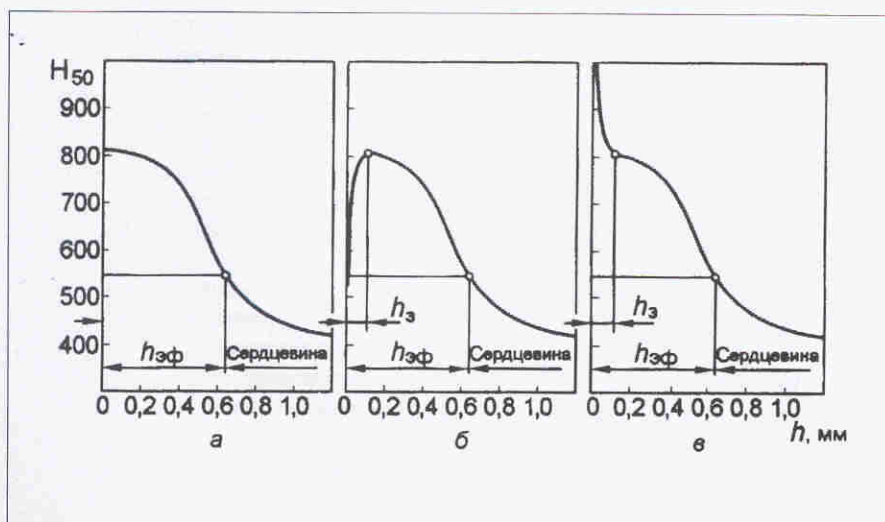


Рис. 2. Распределение микротвердости по глубине изделия:
 $h_ср$ – толщина поверхностной зоны; $h_{эф}$ – эффективная толщина слоя;
 а) – желательное распределение микротвердости по сечению;
 б) – распределение микротвердости по сечению с дефектным поверхностным слоем,
 в) – распределение микротвердости по сечению при использовании специальных методов поверхностного пластического деформирования или нанесении тонкопленочных покрытий

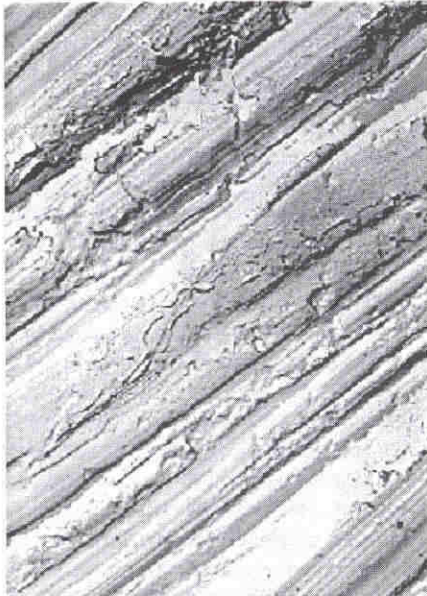


Рис. 3. Топография поверхности после механической обработки нанесенного самофлюсующего покрытия

свойством стеклянных изделий является обеспечение функциональных свойств – «принимать» и сохранять качество пищевых продуктов и напитков в неизменном количестве и качестве и «отдавать» их полностью или частично по мере необходимости. При этом стабильность геометрических размеров формокомплектов является наиболее важной характеристикой, влияющей на потребительские свойства, например на открытие и герметичное закрытие банок для детского питания.

Указанные условия эксплуатации деталей формокомплектов вызывают образование неравномерной упругой деформации деталей, приводящей к искажениям их размеров и формы, накопление микропластической деформации в поверхностных слоях, ускоренное диффузионное перемещение химических элементов, входящих в состав материалов. Все эти явления интенсифицируют процессы разрушения поверхностных слоев деталей формокомплектов.

Наиболее важным фактором инженерии поверхности является разработка системы конструкторских и технологических показателей оценки качества готовых деталей формокомплектов. Данная система предназначена для объективной оценки функциональных свойств деталей формокомплектов, зависящих от свойств поверхностных слоев и структурного состояния материала основы. Эти показатели должны быть отражены в конструкторской документации и в максимальной степени

должны быть связаны с условиями эксплуатации.

Известно, что наиболее распространенным способом оценки распределения прочности по сечению деталей является измерение микротвердости. Обычно для деталей, работающих в условиях трения и износа, стремятся получить распределение микротвердости по сечению, приведенное на рис. 2а. Считается, что в этом случае должна обеспечиваться требуемая долговечность. Однако из-за образования различных дефектов поверхностного слоя, как правило, микротвердость распределяется по слою согласно рис. 2б. И только при использовании специальных финишных методов поверхностного пластического деформирования (ППД) или, нанесении тонкопленочных покрытий микротвердость распределяется, как показано на рис. 2в.

Поэтому уже на стадии конструирования изделий необходимо исключить образование приповерхностной зоны с пониженной микротвердостью. Кроме этого важным фактором при конструировании изделий является получение равномерности микротвердости по всей рабочей поверхности. Из этого требования возникает еще одно условие рационального конструирования – необходимость управления глубиной упрочненного слоя. Таким образом, уже на стадии конструирования необходимо указывать оптимальное соотношение между толщиной и микротвердостью упрочненного слоя и микротвердостью сердцевины. Для изделий типа деталей формокомплектов эти условия могут быть обеспечены только с использованием специальных финишных технологий. При изготовлении формообразующих поверхностей по традиционной технологии всегда имеют место разнотолщинность и неравномерность распределения микротвердости по рабочей поверхности (например, в связи со сложным геометрическим профилем).

Таким образом, лишь при использовании тех-

нологий нанесения тонкопленочных покрытий или процессов ППД на финишной стадии изготовления деталей формокомплектов, обеспечивается увеличение микротвердости на поверхности и однородное распределение значений микротвердости в поверхностном слое.

Методы упрочнения ППД используются в целях повышения микротвердости и сопротивления усталости поверхностного слоя металла, формирования в поверхностном слое напряжений сжатия, а также формирования регламентированного микрорельефа. В результате ППД повышаются все характеристики сопротивления металла деформации, понижается пластичность и увеличивается микротвердость. Упрочнение металла при ППД в незакаленной стали происходит за счет структурных изменений (плотности, качества и взаимодействия дислокаций, количества вакансий и др.) и наведения микронапряжений. При упрочнении закаленных сталей, кроме того, происходит частичное превращение остаточного аустенита в мартенсит и выделение дисперсных карбидных частиц. Поверхностная деформация приводит к образованию сдвигов в зернах, упругому искажению кристаллической решетки, изменению формы и размеров зерен.



Рис. 4. Установка для финишного плазменного упрочнения с нанесением алмазоподобного покрытия

В отличие от технологий ППД нанесение тонкопленочных покрытий дополнительно к повышению микротвердости и созданию сжимающих остаточных напряжений на поверхности обеспечивает значительно большие величины микротвердости, позволяет наносить равномерные по толщине покрытия в сложнодоступных обработке зонах, обеспечивает возможность нанесения химически инертных, диэлектрических покрытий.

В настоящее время в целях повышения долговечности стекольных форм используются технологии газотермического напыления порошков на основе никеля с последующим их оплавлением, процессы газопламенной наплавки или плазменной наплавки. При этом в качестве основного оборудования применяются ручные газопламенные горелки, установки для плазменного и высокоскоростного напыления.

К выбору материала покрытия предъявляются следующие требования: термостойкость, высокая теплопроводность, высокая трещиностойкость. Процесс наплавки может быть использован как для новых, так и для выработанных формокомплектов (в том числе бракованных).

В качестве присадочных материалов применяются самофлюсующие порошки на никелевой основе производства России, Украины, Австрии, Великобритании, Германии, Италии, Швеции и других стран. При этом толщина наплавленного слоя составляет от 1,5 до 3 мм.

Нанесение покрытий указанных типов позволяет повысить стойкость деталей формокомплектов. Но этот процесс нанесения покрытия не является финишной операцией. Окончательная операция – это механическая обработка. Последствия любой финишной операции механической обработки с точки зрения износостойкости деталей демонстрируется на рис. 3, где показан субмикрорельеф рабочих поверхностей образцов, которые исследованы на просвечивающем электронном микроскопе ЭММА-2. На фотографии видны явно выраженные многообразные следы – дефекты от предшествующей обработки. Рациональное изменение топографии поверхности позволит изменить условия эксплуатации деталей формокомплектов и повысит их долговечность.

В последнее 10-летие наблюдается повышенное внимание к алмазоподобным нанопокрытиям. Отличитель-



Рис. 5. Нанесение алмазоподобного покрытия на детали формокомплекта в ООО «ТД «Азовстекло»

ной характеристикой этих покрытий является нанесение на финишной стадии изготовления готовых деталей тонкопленочного покрытия повышенной износостойкости, по своим свойствам близкого к характеристикам алмаза. Покрытие наносится при использовании малогабаритного и маневренного оборудования (рис. 4) при атмосферном давлении в безвакуумном пространстве и при минимальном нагреве изделий в процессе его нанесения (порядка 100 °С).

В целях многократного повышения долговечности деталей формокомплектов разработана технология нанесения алмазоподобного покрытия на их рабочие поверхности. Наносимое покрытие имеет твердость порядка 52 ГПа (что примерно в 5 раз выше, чем твердость наплавленных на детали формокомплектов порошковых покрытий); является термостойким (не изменяет своих характеристик до температуры 1 300 °С), химически инертным (взаимодействует только с плавиковой кислотой); обеспечивает защиту от водородного износа; улучшает параметры шероховатости поверхности; уменьшает коэффициент трения.

Алмазоподобное покрытие деталей формокомплектов обеспечивает защиту от окисления, обезуглероживания, выгорания легирующих элементов, газонасыщения, устраняет образование нагара и отложения графитовых пленок. Использование формокомплектов с алмазоподобным покрытием

уменьшает количество применяемой технологической смазки за счет специфической топографии упрочненной поверхности и более рационального растекания смазки, а также увеличивает «межсмазочный» цикл.

Алмазоподобное покрытие может наноситься на рабочие поверхности деталей формокомплектов различной конфигурации и габаритов. При этом отпадает необходимость в наплавке на рабочие поверхности износостойких порошковых материалов.

Данный метод повышения стойкости деталей формокомплектов с наибольшей эффективностью может использоваться непосредственно на стеклотарных заводах. При этом снижается количество покупаемых и изготавливаемых деталей формокомплектов, повышается производительность труда за счет сокращения времени простоев стеклоформирующих машин для переналадки и настройки, уменьшается количество брака, повышается стабильность длительного сохранения геометрических размеров выпускаемой стеклотары.

Двухлетний практический опыт использования данной технологии на ООО «ТД «Азовстекло» показал, что стойкость формовой оснастки может быть увеличена более чем в 5 раз (рис. 5).

Преимущества данной технологии выявлены и при испытаниях чугунных пуансонов под выработку малых стаканов «Коктейль» (ОАО «Стар Глас», Брянская обл.).