

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ****Юрченко Владимир Ильич**

д-р техн. наук, профессор, директор

ООО «Юрченко и К»

г. Шахты, Ростовская область

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ УДАЛЯЕМОГО СЛОЯ И  
ГЛУБИНЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ  
СТРУЙНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ  
ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР**

*Аннотация: в работе рассматривается возможность аналитического определения величины удаляемого слоя и глубины охлаждения обрабатываемой поверхности при струйно-абразивной обработке синтетических полимерных материалов, применяемых при изготовлении изделий kleевого метода крепления, обеспечивающих требуемое качество обработки заготовок и высокую эффективность технологического процесса. Приводятся зависимости, связывающие величину удаляемого слоя материала и глубину охлаждения обрабатываемой поверхности, с физико-механическими свойствами обрабатываемого материала, абразивных частиц, режимными параметрами процесса струйно-абразивной обработки, а также геометрическими характеристиками обрабатываемых заготовок, позволяющие назначать режимы САО, при которых обеспечиваются требуемое качество и интенсивная обработка материала при минимальных затратах энергии на производство холода и разгон абразивных частиц, учитываются технические возможности основного оборудования, а волны напряжений, вызываемые ударами частиц в процессе САО, не разрушают внутреннюю структуру обрабатываемого материала.*

*Ключевые слова: абразивные частицы, шероховатость поверхности, ударные волны, ударные импульсы, «стоячие» волны, хрупкое состояния, разрушение.*

Струйно-абразивная обработка (САО) применяется во многих отраслях промышленности и народного хозяйства: в тяжёлом машиностроении, в производстве строительных материалов, в космической отрасли, в медицине, в производстве оружейных оптических систем, при декоративной отделке листового стекла и стеклянных изделий, в автосервисе и др. [14, с. 4]. Основной целью САО является удаление некоторого слоя материала с обрабатываемой поверхности и создание на ней микрорельефа с определённой шероховатостью.

Главным достоинством САО является возможность достижения равномерной (постоянной) шероховатости по всей площади обрабатываемой поверхности за счёт отсутствия в технологическом процессе инструмента как твёрдого тела, жестко связанного с обрабатываемым изделием [14, с. 6]. Причём в отличие от существующих способов механической обработки, предусматривающих для получения требуемого качества (требуемой шероховатости) обрабатываемой поверхности неоднократное её прохождение режущим инструментом (фрезами, абразивными кругами, лентами, металлическими щётками, шарошками и др. [7, с. 18]), в процессе САО аналогичный эффект достигается за один проход воздушно-абразивной струи, что позволяет резко повысить производительность обработки [14, с. 14].

Благодаря возможности формирования равномерной шероховатости и высокой эффективности процесса к САО в последние годы заметный интерес проявляют производства, связанные с обработкой деталей клеевого метода крепления, поскольку только равномерная шероховатость склеиваемых поверхностей может обеспечить их равномерную и максимальную (при прочих равных условиях) прочность соединения [5, с. 282].

Например, в индустрии строительных материалов при производстве плиточных и рулонных изделий, изготовленных из различных видов резин, поливинилхлорида, кумарона, фенолита и др. [3, с. 281], применяемых для покрытия полов и несущих оснований, струйно-абразивной обработкой на охлаждённой до стеклообразного состояния поверхности подосновы указанных изделий форми-

руется шероховатость, обеспечивающая максимальную прочность клеевого соединения изделия с основанием [17, с. 201]. С такой же целью обрабатываются детали низа обуви для прочного клеевого соединения их с верхом обуви [18, с. 8]. В производстве специальной одежды и средств индивидуальной защиты рук (рукавиц и перчаток) методом САО обрабатывают полимерные защитные накладки [19, с. 214]. Известны и другие примеры применения САО при подготовке поверхностей полимерных изделий под нанесение клеевых плёнок [5, с. 282].

Для обработки изделий, изготовленных из синтетических полимерных материалов, применяются оборудование и технологии САО, используемые в других производствах. Практика эксплуатации такого оборудования показывает, однако, что особенности поведения синтетических полимерных материалов в условиях ударно-абразивной обработки [6, с. 184; 16, с. 23] не позволяют эффективно использовать традиционные технологии и устройства для САО и обеспечивать требуемое качество обработки деталей.

В связи с этим возникла проблема создания оборудования и разработки технологий для САО, адаптированных только для обработки синтетических полимерных материалов и конкретно – для обработки полимерных изделий клеевого метода крепления широкого ассортимента.

Автором [18, с. 12] предложены технология и оборудование для САО синтетических полимерных материалов, обеспечивающие их качественную и производительную обработку. Отличительной особенностью указанной технологии [18, с. 23] является использование в процессе САО низких температур, переводящих поверхность обрабатываемого материала в хрупкое стеклообразное состояние и обеспечивающих быстрое формирование требуемой шероховатости за счёт интенсивного разрушения поверхностного слоя материала под воздействием абразивных частиц, отделяющих при каждом ударе некоторый объём материала. Перевод эластичного полимера в стеклообразное состояние в соответствии с технологией [18, с. 23] осуществляется охлаждением обрабатываемых

деталей потоком холодного воздуха, формируемого соплом вихревого охладителя [13, с. 6]. При этом для каждого вида полимерного материала существует вполне определённая температура охлаждения [21, с. 33].

К сожалению, в отличие от существующих методов механической обработки деталей, изготовленных из различных материалов (в том числе полимерных), перед склеиванием традиционными инструментами, процесс САО синтетических полимерных материалов в условиях низких температур изучен ещё недостаточно, а научно обоснованные рекомендации по выбору оптимальных режимов САО, обеспечивающих требуемое качество и эффективность обработки, разработаны лишь для некоторых видов материалов [18, с. 12].

Таким образом, актуальной, на наш взгляд, становится проблема прогнозирования численных значений наиболее значимых факторов, определяющих качество и эффективность струйно-абразивной обработки изделий клеевого метода крепления, изготовленных из любых синтетических полимерных материалов.

Если учесть, что качество обработанной механическим способом (различными режущими, абразивными, царапающими и др. инструментами [7, с. 27] поверхности характеризуется (в том числе) степенью её шероховатости [10, с. 17], формируемой в результате удаления определённого объёма материала, величина удаляемого слоя может рассматриваться как фактор, определяющий качество поверхности при САО.

А одним из факторов эффективности (производительности) процесса САО является, по нашему мнению, глубина охлаждения обрабатываемой поверхности, поскольку её величина должна ограничиваться только толщиной удаляемого слоя материала.

Рассмотрим последовательно каждый из этих факторов.

Исследователи [12, с. 122; 2, с. 183], занимающиеся вопросами струйно-абразивной обработки синтетических полимерных материалов, отмечают, что формирование текстуры (рисунка) обрабатываемой поверхности с характерной для каждого режима САО шероховатостью происходит весьма непродолжительное время – до 10 с, затем полученный профиль поверхности копируется, оставаясь

неизменным сколь угодно долго. Поэтому кроме параметров процесса САО (давления сжатого воздуха, размера абразивных частиц, продолжительности обработки, угла атаки абразивной струи, расстояния от среза сопла, формирующего струю, до обрабатываемой поверхности и др. [18, с. 21]), обеспечивающих для каждого вида полимерного материала требуемую шероховатость обрабатываемой поверхности, важно знать ещё величину износа материала, точнее, толщину удаляемого слоя обрабатываемой поверхности, необходимую и достаточную для достижения требуемого качества обработки и обеспечения необходимых эксплуатационных свойств обработанной детали.

В работах, посвященных исследованию эрозионного износа, по-разному трактуется физический смысл количественной характеристики износа и предлагаются различные методики его расчета [9, с. 319]. По нашему мнению, наиболее приемлемая для случая САО полимеров формулировка эрозионного износа приводится у К. Веллингера [4, с. 52] и И.В. Крагельского [9, с. 320].

В общем случае в качестве характеристики износа принимается отношение массы изношенного материала к массе изнашивающего [9, с. 321], то есть

$$I = \frac{3V_m \rho_m}{4\pi R_a^3 \rho_a q}, \quad (1)$$

где  $V_m$  – изношенный объем материала;  $\rho_m$  и  $\rho_a$  – плотности изношенного материала и изнашивающих абразивных частиц соответственно;  $R_a$  – радиус шарообразных абразивных частиц;  $q$  – число частиц, вызвавших износ.

Величину эрозионного износа полимерных материалов можно определить из выражений, предложенных в работе [9, с. 333] для случаев упругого и пластического контакта абразивных частиц с обрабатываемой поверхностью.

Однако при САО полимерных материалов в условиях низкотемпературного охлаждения формулы из [9, с. 333] для определения износа в представленном виде использовать нельзя, поскольку даже в хрупком (стеклообразном) состоянии полимеры проявляют как упругие, так и пластические свойства [1, с. 152; 11, с. 43]. Поэтому при определении эрозионного износа стеклообразных полимеров, по нашему мнению, должен учитываться весь комплекс деформационных

свойств обрабатываемых материалов, проявляемых ими в условиях низких температур.

Принимая во внимание зависимости, предложенные в [9, с. 333] и [4, с. 52], общий (полный) износ  $I_o$  стеклообразных полимеров при САО можно определить из выражения

$$I_o = I_y c_y + I_{\text{пл}} c_{\text{пл}}, \quad (2)$$

где  $I_y, I_{\text{пл}}$  – износ материала при упругом и пластическом контактах с абразивной частицей соответственно;  $c_y, c_{\text{пл}}$  – коэффициенты, учитывающие долю износа при упругом и пластическом контактах частиц с материалом соответственно.

В формуле (2) величина коэффициентов  $c_y$  и  $c_{\text{пл}}$  колеблется в пределах от нуля до единицы (в зависимости от физико-механических свойств материала и температуры [20, с. 141]), однако в любом случае должно соблюдаться условие

$$c_y + c_{\text{пл}} = 1.$$

Нетрудно заметить, что из зависимостей, предложенных в работах [9, с. 333] и [4, с. 52], а также из (1), (2) можно определить лишь удельный износ материала, величина которого при установившемся режиме САО постоянна в течение всего периода обработки поверхности. В нашем случае, однако, необходимо знать численное значение минимальной толщины удаляемого в результате САО слоя материала, обеспечивающей требуемое качество обрабатываемой поверхности и необходимые эксплуатационные свойства обработанной детали.

Учитывая, что в соответствии с (1)

$$I = \frac{V_m \rho_m}{V_a \rho_a}, \quad (3)$$

где объем  $V_m$  разрушенного в результате обработки материала можно представить как  $V_m = Sh$  (здесь  $S$  – площадь обрабатываемой поверхности;  $h$  – толщина удаленного при САО материала), искомая величина  $h$  определится из выражения

$$h = \frac{I_o V_a \rho_a}{\rho_m S}, \quad (4)$$

где  $V_a = 4\pi R_a^3 q/3$  – объем абразивных частиц, вызвавших износ  $V_m$  материала.

Количество абразивных частиц  $q$  в струе рассчитывается следующим образом:

$$q = c_a V_c,$$

где  $c_a$  – концентрация абразивных частиц в струе;  $V_c$  – объем воздушно-абразивной струи.

Если струя цилиндрическая (с «нулевым» или малым углом распыла), то

$$V_c = S_c L = \pi R_c^2 L,$$

где  $S = \pi R_c^2$  – площадь сечения струи (здесь  $R_c$  – радиус сопла струйного устройства);  $L$  – длина струи.

В случае большого угла распыла струя имеет форму усеченного конуса, тогда

$$V_c = \pi L (R_c^2 + R_c R_\pi + R_\pi^2) / 3,$$

где  $R_\pi$  – радиус пятна контакта струи с обрабатываемой поверхностью.

Концентрацию  $c_a$  частиц в струе можно определить из выражения, предложенного в работе [18, с.24]:

$$c_a = c_o \exp \left( -\frac{4}{3} R_a^3 \rho_a g L / k'' T \right) \left[ 1 - \left( \frac{r}{R_c + L \tan \beta} \right)^2 \right]^3,$$

где  $c_o$  – концентрация частиц на оси струи при выходе из сопла (определяется экспериментально [18, с. 21]);  $g$  – ускорение свободного падения;  $k''$  – коэффициент пропорциональности, имеющий размерность постоянной Больцмана;  $T$  – абсолютная температура;  $r$  – радиус струи;  $\beta$  – угол распыла струи.

Необходимо отметить, однако, что представленные формулы для определения объема  $V_c$  воздушно-абразивной струи в практических расчётах используются весьма редко, только в случае, если струя (точнее, её ось) перпендикулярна к обрабатываемой поверхности. В реальных технологиях САО такая ситуация встречается нечасто. Как правило, ось струи наклонена к поверхности под некоторым углом (так называемом «углом атаки») [14, с. 18]. В этом случае объем струи вычисляется по методике, предложенной автором в работе [21, с. 28] для расчёта объема конуса с непараллельными основаниями, большее из которых (по

площади) является пятном контакта струи с обрабатываемой поверхностью, а меньшее – срезом сопла струйного устройства, перпендикулярного оси струи.

Анализ формулы (4) показывает, что в ней содержатся все наиболее значимые параметры процесса САО, а также параметры, характеризующие свойства обрабатываемого материала и абразивных частиц. Следовательно, если учесть, что одним из параметров шероховатости является средняя высота неровностей (выступов и впадин) на поверхности, сформированных в результате механической обработки [10, с. 17] со снятием определённого объёма материала, то толщину  $h$  удаляемого слоя материала можно рассматривать как критерий, которым можно оценивать качество САО поверхности любого полимерного материала или изделия перед склеиванием, а зависимость (4) позволяет прогнозировать ожидаемую величину  $h$  при любых сочетаниях параметров процесса САО, сравнивать её расчетное значение с эталонными (нормативными) значениями, полученными экспериментальным путем для различных видов материалов и изделий, и назначать такие режимы струйно-абразивной обработки, которые обеспечивали бы требуемое качество поверхности изделий под нанесение клеевых плёнок, необходимые эксплуатационные свойства клеевого соединения и максимальную производительность обработки.

Поскольку целью САО изделий клеевого метода крепления является формирование на обрабатываемой поверхности шероховатости, необходимой и достаточной для обеспечения требуемой (в том числе максимальной) прочности склеивания с другими поверхностями, здравый смысл подсказывает, что для увеличения производительности процесса САО и уменьшения затрат на производство холода охлаждать необходимо только тот слой детали, который подвергается обработке. Другими словами, глубина охлаждения обрабатываемого материала не должна превышать величину требуемой шероховатости поверхности, обеспечивающей нормируемые эксплуатационные показатели клеевого соединения.

Это предположение, однако, несмотря на кажущуюся убедительность и простоту, требует проверки, которая возможна, на наш взгляд, путём анализа закономерностей распространения ударных волн в вязкоупругой среде (в нашем случае – в стеклообразных полимерах) и влияния этих закономерностей на деформационное поведение обрабатываемого материала, так как САО представляет собой процесс ударного взаимодействия абразивных частиц с обрабатываемым материалом.

В работе [21, с. 23] были получены зависимости для определения скорости  $V_a$  абразивных частиц, при которой исключается возможность разрушающего действия ударных импульсов на структуру обрабатываемого материала при САО.

Указанные условия являются необходимыми для предотвращения образования импульсов с максимальной амплитудой (превышающей предел прочности материала), однако недостаточными для предотвращения формирования так называемых «стоячих» волн, действие которых может привести к нежелательным для обрабатываемого материала разрушениям.

Опасность стоячей волны для материала обрабатываемой детали при ударном нагружении заключается в том, что в результате образования (при сложении прямой и обратной волн) так называемых «узлов» и «пучностей» материал оказывается подверженным циклическим нагрузкам с частотой  $v$  начального импульса и удвоенной (по сравнению с начальной) амплитудой, которые при превышении определённого числа циклов могут привести к усталостному разрушению структуры материала [9, с. 327].

При этом, однако, необходимо отметить, что образование стоячих волн возможно, строго говоря, только при условии равенства начальных амплитуд, частот и длин прямой и обратной волн. В случае же затухающих колебаний, имеющих место в условиях САО реальных материалов, обладающих вязким трением, условие равенства амплитуд импульсов не выполняется, поскольку при своём распространении прямая волна встречает сопротивление структурных

единиц материала и изменение её амплитуды подчиняется экспоненциальной зависимости вида [21, с. 15].

Тем не менее, если учесть, что при САО указанных ранее изделий изменение амплитуды прямой волны после отражения ничтожно мало (поскольку импульс проходит весьма малое расстояние, равное толщине охлаждённого слоя обрабатываемой детали, при малых коэффициентах затухания, присущих синтетическим полимерным материалам в стеклообразном состоянии [15, с. 432]), можно предположить, что вероятность образования стоячей волны в этом случае достаточно велика.

Для того, чтобы при отражении ударных импульсов в материале не возникали стоячие волны, необходимо соблюдать условие [8, с. 124]

$$l \neq 0,5n\lambda, \quad (5)$$

где  $l$  – путь ударной волны от источника её возникновения до границы отражения;  $n$  – любое целое положительное число;  $\lambda=c_{3\theta}/v$  – длина волны (здесь  $c_{3\theta}$  – скорость звука в обрабатываемом материале; величина  $v=f(V_a)$  определяется по методике, предложенной в [18, с. 13], при этом значение скорости  $V_a$  абразивных частиц должно соответствовать условиям, указанным выше).

Учитывая, что охлаждаемый слой детали не должен быть меньше средней величины  $H_{cp}$  требуемой шероховатости поверхности и (что очевидно) превышать толщину  $B$  обрабатываемой детали, искомая величина  $h_{oxl}$  глубины охлаждения детали при САО с учетом (5) определится из условий

$$\left. \begin{array}{l} H_{cp} \leq h_{oxl} \leq B, \\ h_{oxl} \neq 0,5n\lambda. \end{array} \right\} \quad (6)$$

Таким образом, выполняя условия (6), можно для любого полимерного материала рассчитать такую глубину охлаждения обрабатываемой поверхности, при которой волны напряжений, вызываемые ударами абразивных частиц, не разрушат внутреннюю структуру материала, а процесс обработки деталей будет производительным и экономичным.

**Список литературы**

1. Бартенев Г.М. Курс физики полимеров / Г.М. Бартенев, Ю.В. Зеленев. – Л.: Химия, 1976. – 288 с.
2. Бартенев Г.М. Трение и износ полимеров / Г.М. Бартенев, В.В. Лаврентьев. – Л.: Химия, 1972. – 236 с.
3. Болдырев А.С. Строительные материалы / А.С. Болдырев, П.П. Золотов. – М.: Стройиздат, 1989. – 567 с.
4. Веллингер К. Изнашивание струёй абразивного материала / К. Веллингер, Г. Уетц // Сб. тр. и переводов обзоров ин. лит. Сер. машиностр. – 1956. – №2 (32). – С. 52–77.
5. Волков С.С. Сварка и склеивание полимерных материалов. – М.: Химия, 2000. – 376 с.
6. Гуль В.Е. Структура и механические свойства полимеров / В.Е. Гуль, В.Н. Кулезнев. – М.: Химия, 1966. – 316 с.
7. Егоров С.В. Резание конструкционных материалов и режущий инструмент / С.В. Егоров, А.Г. Червяков. – М.: Высш. школа, 1975. – 188 с.
8. Ионов В.Н. Напряжения в телах при импульсном нагружении / В.Н. Ионов, П.М. Огибалов. – М.: Высш. школа, 1975. – 463 с.
9. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
10. Мельников Н.Ф. Технология машиностроения / Н.Ф. Мельников, Б.Н. Бристоль, В.И. Дементьев. – М.: Машиностроение, 1977. – 327 с.
11. Пенкин Н.С. Влияние упругих свойств материалов на процесс изнашивания потоком абразивных частиц // Тр. Ленинградского ин-та водного транспорта. – 1966. – Вып. 86. – С. 43–50.
12. Стыллер Е.Е. Трение и износ полимерных материалов под воздействием струи твёрдых частиц / Е.Е. Стыллер, Е.Ф. Непомнящий, С.Б. Ратнер // Повышение износостойкости и сроки службы машин. – Киев: УКРНИИНТИ, 1970. – Вып. IV. – С. 122–128.

13. Суслов А.Д. Вихревые аппараты / А.Д. Суслов, С.В. Иванов. – М.: Машиностроение, 1985. – 256 с.
14. Толстов Б.М. Состояние и развитие струйно-абразивной обработки / Б.М. Толстов, Л.А. Пикулина. – М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1990. – 38 с.
15. Ферри Д. Вязкоупругие свойства полимеров. – М.: Мир, 1963. – 535 с.
16. Штучный Б.П. Механическая обработка пластмасс. – М.: Машиностроение, 1987. – 152 с.
17. Юрченко В.И. Применение струйно-абразивной обработки в производстве полимерных изделий для покрытия полов / В.И. Юрченко, В.А. Сухарникова // Современные технологии в промышленности строительных материалов и стройиндустрии: Сборник статей Международного конгресса, 16–18 сентября 2003 г. – Белгород, БГТУ, 2003. – Ч. I. – № 5. – С. 198–201.
18. Юрченко В.И. Влияние конструктивно-технологических факторов на интенсификацию процесса струйно-абразивной обработки деталей низа обуви перед склеиванием: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1990. – 28 с.
19. Юрченко В.И., Юрченко Н.И. Технология изготовления средств индивидуальной защиты рук с защитным слоем на основе вторичных полимерных материалов // Материалы и технологии XXI века-2007: Сборник статей V Международной научно-технической конференции, 21–22 марта 2007 г. – Пенза, ПДЗ, 2007. – С.214-216.
20. Юрченко В.И. Механическое оборудование для ударно-абразивной обработки синтетических полимерных строительных материалов при низких температурах. – Новочеркасск: ЛИК, 2010. – 196 с.
21. Юрченко В.И. Прогнозирование результатов ударно-абразивной обработки искусственных обувных материалов при низких температурах и принципы создания оборудования: Автореф. дис. ...докт. техн. наук. – М., 2006. – 40 с.