

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Юрченко Владимир Ильич

д-р техн. наук, профессор, директор

ООО «Юрченко и К»

г. Шахты, Ростовская область

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СКОРОСТИ СОУДАРЕНИЯ АБРАЗИВНЫХ
ЧАСТИЦ С ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ПРИ СТРУЙНО-
АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ НИЗА ОБУВИ
КЛЕЕВОГО МЕТОДА КРЕПЛЕНИЯ**

***Аннотация:** в данной работе рассматривается возможность аналитического определения оптимальной скорости абразивных частиц при струйно-абразивной обработке синтетических полимерных материалов, применяемых при изготовлении деталей низа обуви клеевого метода крепления, обеспечивающей требуемое качество обработки заготовок. Приводятся зависимости, связывающие скорость абразивных частиц с физико-механическими характеристиками материалов, подвергаемых обработке, с характеристиками самих частиц, а также параметрами процесса обработки, позволяющие назначать такую допускаемую скорость соударения частиц с обрабатываемой поверхностью, при которой ударные импульсы, вызываемые частицами, не разрушают внутреннюю структуру материала, а процесс струйно-абразивной обработки сводится только к микрорезанию.*

***Ключевые слова:** адгезия, синтетические полимеры, абразивные частицы, скорость частиц, разрушение, микрорезание, шероховатость обрабатываемой поверхности, ударные волны, ударные импульсы, волны напряжений.*

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, в автосервисе и др. [13, с. 4]. Основной целью САО

является удаление некоторого слоя материала с обрабатываемой поверхности и создание на ней микрорельефа с определённой шероховатостью.

В обувном производстве САО стала применяться сравнительно недавно [6, с. 4]. Её использование обусловлено необходимостью обеспечения высокой адгезии (и как следствие – высокой прочности соединения) при склеивании деталей низа обуви (подошв, каблуков), изготовленных из эластичных синтетических полимерных материалов (различных видов резин, эластопластов, поливинилхлорида, полиуретана и др. [15, с. 6], с верхом обуви.

Главным достоинством САО является возможность достижения равномерной шероховатости по всей площади обрабатываемой поверхности за счёт отсутствия в технологическом процессе инструмента как твёрдого тела, жестко связанного с обрабатываемым изделием [13, 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. [2, с. 12]), в процессе САО аналогичный эффект достигается за один проход воздушно-абразивной струи, что позволяет резко повысить производительность обработки [13, с. 14]. Равномерная шероховатость поверхности, полученная в результате САО, обеспечивает (при прочих равных условиях) достижение равномерной прочности склеивания соединяемых деталей [16, с. 21].

Наиболее эффективной технологией САО синтетических обувных материалов в настоящее время является технология [15, с. 28], обеспечивающая обработку поверхности, находящейся в хрупком состоянии, поскольку в этом случае при каждом ударе абразивной частицы по поверхности детали от неё отделяется некоторый объем материала. Перевод эластичного полимера в стеклообразное (хрупкое) состояние в соответствии с технологией [15, с. 30] осуществляется охлаждением обрабатываемых деталей потоком холодного воздуха, формируемого соплом вихревого охладителя [12, с. 6]. При этом для каждого вида полимерного материала существует вполне определённая температура охлаждения [9, с. 123].

К сожалению, в отличие от существующих методов механической обработки деталей обуви перед склеиванием традиционными инструментами, процесс САО синтетических обувных материалов изучен ещё недостаточно, а научно обоснованные рекомендации по выбору оптимальных режимов САО, обеспечивающих требуемое качество обработки, разработаны лишь для некоторых видов материалов низа обуви [16, с. 14].

В связи с этим актуальной становится проблема прогнозирования оптимальных значений наиболее значимых факторов процесса САО деталей низа обуви, изготовленных из любых синтетических полимерных материалов. Одним из таких факторов, определяющих качество и производительность обработки, является скорость V_a абразивных частиц в момент контакта (соударения) с обрабатываемой поверхностью.

Известно [3, с. 118], что формирование новой поверхности при струйно-абразивной обработке происходит в результате двух видов разрушения: деформационного и посредством резания. К сожалению, в зависимости от скорости абразивных частиц эти процессы могут оказывать прямо противоположное влияние на качество обработки обувных деталей перед склеиванием.

Если в результате микрорезания полимерного материала режущими кромками абразивных частиц формируется вполне ожидаемая при любых значениях технологических режимов САО (в том числе и скорости частиц) текстура (рисунок) поверхности с равномерной шероховатостью, обеспечивающей при определенных (оптимальных) режимах обработки требуемые эксплуатационные свойства клеевого соединения, то при действии ударных волн вызываемые ими разрушения (поверхностные или внутренние сколы и (или) бессистемно расположенные на обрабатываемой поверхности кратеры различного диаметра и глубины) ни при каких сочетаниях режимов САО равномерную шероховатость обрабатываемой поверхности обеспечить не могут; разрушенной оказывается внутренняя структура материала, в результате чего обработанная деталь становится непригодной для дальнейших технологических операций. При этом процесс разрушения материала ударными вол-

нами в общем случае носит неуправляемый характер, поскольку дефекты структуры реального материала, отвечающие за указанные разрушения, распределены по его объему совершенно случайно; случайными являются и их количество, геометрические параметры, физическая и химическая природа и др. В результате качественная картина разрушений поверхности и внутренней структуры номинально идентичных образцов при идентичных условиях испытаний совершенно различна, а само разрушение дефектной структуры материала можно прогнозировать лишь с привлечением статистических методов [1, с. 431].

Следовательно, возникает необходимость создания таких условий обработки деталей обуви методом САО, при которых исключается возможность негативного влияния ударных волн на качество обработки. Другими словами, в процессе САО необходимо не допускать назначения такой скорости абразивных частиц, при которой напряжения, вызываемые ударными импульсами, могут превысить предел прочности $[\sigma_p]$ обрабатываемого материала, то есть

$$\sigma_k e^{-\delta t} < [\sigma_p], \quad (1)$$

где $\sigma_k = 1,65 E_d^{-\delta t} \left[\frac{\rho_a}{\rho_m (1 - \mu_m^2)^4} \right]^{1/5} \left(\frac{v_a}{c_{зв}} \right)^{2/5} \sin(\nu t)$ (здесь E_d – динамический модуль упругости материала; ρ_a , ρ_m – плотность соответственно абразивных частиц и материала; μ_m – коэффициент Пуассона материала; $c_{зв}$ – скорость звука в материале; t – время; ν – частота нагружения материала, определяемая из соотношения [11, с. 125]

$$\nu = \frac{\left\{ V_0 \left(1 - \frac{3c\rho_b L}{4R_a \rho_a} \right)^{1/2} \left[1 - \left(\frac{r}{R_c + L \tan \beta} \right)^{3/2} \right]^2 \right\}^{1/5}}{10,3 R_a \rho_a^{2/5} \left(\frac{1 - \mu_a^2}{E_a} + \frac{1 - \mu_m^2}{E_m} \right)^{2/5}},$$

где V_0 – начальная скорость истечения абразивных частиц на срезе сопла струйного устройства; c – коэффициент, зависящий от формы тела; ρ_s – плотность воздуха; R_a – радиус абразивных частиц; L – расстояние от среза сопла струйного устройства до обрабатываемой поверхности; R_c – радиус сопла струйного устройства; r – расстояние от оси воздушно-абразивной струи до исследуемой точки; β – угол распыла

струи; E_a , E_m – модули упругости соответственно абразивных частиц и материала; μ_a – коэффициент Пуассона абразивных частиц);

$\delta = \beta/2m$ – коэффициент затухания (здесь β – коэффициент вязкого трения; m – масса колебательной системы).

Кроме того для предотвращения ударного резонанса необходимо, чтобы $\delta < \frac{v_m V_a}{2}$ (здесь v_m – частота собственных колебаний ударной системы, определяется экспериментально [5, с. 131; 10, с. 94]).

Условие (1) справедливо, однако, только для прямой полностью затухающей волны напряжений. Если же ударный импульс встречает на своем пути границу (поверхность) отражения, происходит его трансформация (преобразование), в результате которой прямая и обратная волны суммируются, и в случае симметричного начального импульса и одинакового знака фаз амплитуда отраженной волны может достигнуть удвоенного значения амплитуды прямой волны [7, с. 89; 8, с. 201; 14, с. 11].

При осуществлении технологий [16, с. 14] САО обувных деталей возможны следующие варианты и условия трансформации ударных импульсов.

1. *Граница отражения волны свободна от напряжений.* При таком условии весь объем обрабатываемой детали должен находиться в одном физическом состоянии (в нашем случае деталь должна быть охлаждена по всему объему), а поверхность отражения ударной волны не должна иметь жёсткой связи с другой средой (деталь не закрепляется по поверхности отражения).

В этом случае отражённый импульс противоположен по знаку прямой волне. Например, если падающая волна представляет собой импульс сжатия, то обратная – импульс растяжения.

2. *Граница отражения волны жёстко фиксирована.* При таком условии обрабатываемая деталь полностью охлаждена, а её поверхность, противоположная обрабатываемой (поверхность отражения), механически жёстко закреплена.

В этом случае отраженная волна имеет такой же знак, как и прямая.

3. Граница отражения волны разделяет среды с разной плотностью, причём среда, по которой распространяется волна, имеет плотность большую, чем сопредельная. При таком условии обрабатываемая деталь имеет два однородных слоя, один из которых (подвергаемый обработке) охлаждается. Плотность охлажденного слоя превышает плотность неохлажденного [4, с. 113; 8, с. 74].

В этом случае прямая и отраженная волны имеют одинаковый знак.

Во всех описанных случаях эволюция ударных волн сопровождается наложением (интерференцией) прямого и обратного импульсов.

С учетом вышеизложенного условие (1) примет вид

$$2\sigma_k e^{-\delta t} < [\sigma_p],$$

или

$$\sigma_k < 0,5e^{-\delta t}[\sigma_p]. \quad (2)$$

Анализ неравенства (2) показывает, что его решение должно сводиться к определению скорости V_a абразивных частиц (в момент контакта с обрабатываемой поверхностью), обеспечивающей целостность внутренней структуры материала в результате воздействия на него ударных волн.

Действительно, при фиксированных значениях времени t обработки детали и других параметров для каждого конкретного вида обрабатываемого материала и абразивных частиц в условии (2) только V_a и v функционально зависимы ($v = f(V_a)$), поэтому, принимая скорость частиц в качестве аргумента функции $\sigma_k = f(V_a)$, можно в соответствии с (2) найти такое её значение, при котором ударные волны не разрушат материал в результате САО.

Обозначив в (2)

$$1,65E_d \left[\frac{\rho_a}{\rho_m(1-\mu_m^2)^4} \right]^{1/5} \sin(vt) = k,$$

и выполнив соответствующие преобразования, получим

$$V_a < c_{зв} (0,5[\sigma_p] e^{\delta t} k^{-1})^{5/2}. \quad (3)$$

Последнее неравенство справедливо, однако, только при условии, если граница отражения ударного импульса свободна от напряжений. В двух других рассмотренных случаях к моменту распространения ударных волн поверхность отражения находится в напряженном состоянии. Поля напряжений появляются в результате жесткого механического закрепления детали [7, с. 102] и разности температур охлажденного и неохлажденного слоёв обрабатываемого материала [7, с. 104].

Поэтому для указанных случаев условие (3) изменится следующим образом:

а) при жестком закреплении поверхности отражения ударного импульса

$$V_a < c_{зв} [0,5([\sigma_p] - \sigma_{мех}) e^{\delta t} k^{-1}]^{5/2}; \quad (4)$$

б) при охлаждении обрабатываемой поверхности

$$V_a < c_{зв} [0,5([\sigma_p] - \sigma_{тепл}) e^{\delta t} k^{-1}]^{5/2}, \quad (5)$$

где $\sigma_{мех}$ и $\sigma_{тепл}$ – напряжения в материале на границе отражения ударной волны, вызванные механическим закреплением детали и охлаждением обрабатываемой поверхности соответственно (расчет $\sigma_{мех}$ и $\sigma_{тепл}$ и их практическое измерение производятся в соответствии с известными методами теории упругости и методиками экспериментального исследования применительно к тонким пластинкам [5, с. 113]).

Таким образом, пользуясь соотношениями (3–5), можно для любого вида обрабатываемого материала определить такую допускаемую скорость $[V_a]$ соударения абразивных частиц с его поверхностью, при которой ударные импульсы не вызовут разрушение материала, а процесс САО сведётся только к микрорезанию обрабатываемой поверхности.

Список литературы

1. Александров Е.В. Прикладная теория и расчёты ударных систем / Е.В. Александров, В.Б. Соколинский. – М.: Наука, 1969. – 568 с.
2. Бабин Г.Е. Механическая обработка деталей низа обуви. – М.: Легпром-бытиздат, 1986. – 128 с.

3. Бартенев Г.М. Трение и износ полимеров / Г.М. Бартенев, В.В. Лаврентьев. – Л.: Химия, 1972. – 236 с.
4. Бартенев Г.М. Курс физики полимеров / Г.М. Бартенев, Ю.В. Зеленев. – Л.: Высш. школа, 1976. – 288 с.
5. Батуев Г.С. Инженерные методы исследования ударных процессов / Г.С. Батуев, Ю.В. Голубков. – М.: Машиностроение, 1969. – 251 с.
6. Бескоровайный В.В. Исследование и разработка процесса струйно-абразивной обработки деталей обуви с целью создания технологической установки: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1983. – 24 с.
7. Бескоровайный В.В. Механизмы хрупкого разрушения и мягчения натуральных кож ударом / В.В. Бескоровайный, В.И. Юрченко. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2004. – 126 с.
8. Каргин В.А. Краткие очерки по физико-химии полимеров / В.А. Каргин, Г.Л. Слонимский. – М.: Химия, 1967. – 232 с.
9. Кулезнев В.Н. Химия и физика полимеров / В.Н. Кулезнев, В.А. Шершнев. – М.: Высш. школа, 1988. – 321 с.
10. Перепечко И.И. Акустические методы исследования полимеров. – М.: Химия, 1973. – 293 с.
11. 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: УкрНИИТИ, 1970. – Вып. IV. – С. 122–128.
12. Суслов А.Д. Вихревые аппараты / А.Д. Суслов, С.В. Иванов. – М.: Машиностроение. 1985. – 256 с.
13. Толстов Б.М. Состояние и развитие струйно-абразивной обработки / Б.М. Толстов, Л.А. Пикулина. – М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1990. – 38 с.
14. Эйзнер Л.А. Применение эффективных методов и средств струйно-абразивной обработки для повышения производительности труда на отделочно-зачистных операциях: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Гомель, 1983. – 23 с.

15. Юрченко В.И. Прогнозирование результатов ударно-абразивной обработки искусственных обувных материалов при низких температурах и принципы создания оборудования: Автореф. дис. ... д-ра. техн. наук. – М., 2006. – 40 с.

16. 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.