

7. Сметанников О. Ю., Труфанов Н. А. Численный анализ технологических и остаточных напряжений в стеклюющихся телах // Вычислительная механика сплошной среды. 2008. Т. 1. № 1. С. 92–108.

8. Ильюшин А. А. Труды. Т. 3. Теория термовязкоупругости. М.: Физматлит, 2007.

9. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. М.: Мир, 1982.

10. Bapanapalli S. K., Smith L. V. A linear finite element model to predict processing-induced distortion in FRP laminates // Composites: Part A. 2005. Vol. 36. P. 1666–1674.

11. Zocher M. A., Groves S. E., Allen D. H. A three-dimensional finite element formulation for thermoviscoelastic orthotropic media // Int. J. Numer. Meth. Eng. 1997. Vol. 40. P. 2267–2288.

A. E. Burov

### PREDICTING OF A COMPOSITE ANGLE ELEMENT WARPAGE DUE TO INDUCED STRESS PROCESS

*The article presents experimental and numerical analysis results of induced stress-strain state in the process of manufacturing of a piece of composite material.*

*Keywords: process induced stress, numerical analysis, springforward, polymer composite material.*

© Буров А. Е., 2011

УДК 621.924

В. А. Левко, П. А. Снетков, Е. Б. Пшенко

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АБРАЗИВНО-ЭКСТРУЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ КАНАЛОВ С ПЕРЕМЕННОЙ ФОРМОЙ СЕЧЕНИЯ\*

*Проведены исследования потока рабочей среды в кольцевой щели. Установлена степень влияния площади сечения щели и состава рабочей среды на параметры обработки. Разработаны рекомендации по применению выравнивающих устройств.*

*Ключевые слова: абразивно-экструзионная обработка, кольцевая щель, рабочая среда, площадь поперечного сечения, выравнивающее устройство.*

В номенклатуре деталей машиностроительного производства встречаются детали, имеющие внутренние каналы с переменной формой поперечного сечения. Например, для внутреннего канала сопел-насадок характерно сочетание цилиндрической и конусной частях.

Практика экспериментальной абразивно-экструзионной обработки (АЭО) таких деталей без применения каких-либо выравнивающих устройств выявила неравномерность качества обработанной поверхности каналов в цилиндрической и конусной части.

Рабочая среда при АЭО представляет собой вязкоупругую среду, наполненную абразивными зернами. Свойства рабочей среды описаны в работах [1; 2]. При сдвиговом течении в обрабатываемом канале в потоке рабочей среды возникают как касательные, так и нормальные напряжения. Абразивные зерна при течении образуют вязкоупругие цепочки, деформация отдельных звеньев которых оказывает дополнительное влияние на общую деформацию рабочей среды [3]. Вид и характер деформации рабочей среды оказывает влияние на условия контакта микровыступов единичного абразивного зерна с микровыступами обрабатываемой поверхности и учитывается в модели контактных взаимодействий при АЭО [4].

Визуальные исследования течения рабочей среды в конусных каналах позволили уточнить качественную картину потока. Установлено, что равномерности обработки в конусном канале без применения специальных выравнивающих устройств добиться сложно, поскольку изменение профиля потока рабочей среды происходит непосредственно в обрабатываемом канале [5].

Для обеспечения равномерной обработки таких каналов нами предложено устройство, выравнивающее сечение канала по его длине. При этом происходит переход от течения среды через местное сопротивление (конус) к течению в кольцевом канале.

Исследования проведены в два этапа на установке УЭШ-25 с использованием устройства, которое имитирует течение в кольцевой щели (рис. 1). На первом этапе установлены эмпирические зависимости шероховатости обработанной поверхности  $Ra$ , а также величина ее изменения в ходе обработки  $\Delta Ra$  и величина изменения диаметра отверстия  $\Delta D$  исследуемого образца в зависимости от дисперсности наполнителя  $Вa'$  среды и площади зазора  $S_{\text{зав}}$  между обрабатываемой поверхностью и внутренним телом.

\*Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные, научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.». Грант № П 11 21.

Образец 1 помещен во внутреннюю выточку корпуса 4 и закрыт крышкой 3, образующей с корпусом 4 замковое соединение. Внутренние диаметры образца 1, крышки 3 и корпуса 4 имеют одинаковые номинальные размеры. С других торцов корпуса 4 и крышки 3 выполнены ступенчатые выточки, на которых базируются основания 5. В эти основания вставлялось внутреннее тело 2. При помощи переходников 6 устройство смонтировано в установку, а его части закреплены относительно друг друга зажимным устройством.

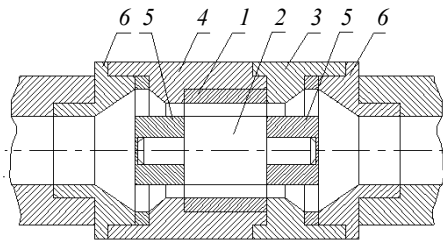


Рис. 1. Устройство-имитатор кольцевой щели

Изменением диаметра внутреннего тела варьировалась площадь зазора  $S_{\text{зз}}$  между обрабатываемой внутренней поверхностью образца 1 и внутренним телом 2. Основания 5 выполнены в виде диска со ступицей. В центральную выточку ступицы оснований 5 установлены верхняя и нижняя ступени внутреннего тела 2 соответственно, причем торцы оснований являются установочной базой для основной ступени внутреннего тела 2. Диски оснований 5 закреплены в выточках корпуса 4 и крышки 3 и имеют по четыре отверстия – канала, по которым рабочая среда течет через устройство. Наружные диаметры основных ступеней сменных внутренних тел 2 обеспечивают зазоры  $S_{\text{зз}}$  с площадью поперечных сечений 10; 17,5 и 25,5 мм<sup>2</sup>. Набор сменных внутренних тел и оснований показан на рис. 2.

Шероховатость Ra обработанной поверхности измерена на профилометре М 252, а величина  $\Delta D$  – на линейном микроскопе УИМ. Перед измерениями образцы выдерживались в течение 30 минут при температуре  $20 \pm 2$  °С.



Рис. 2. Основание и набор сменных внутренних тел

Условия эксперимента: внутренний диаметр образцов – 30 мм; площадь зазора – 10; 17,5; 25,5 мм<sup>2</sup>; рабочее входное давление – 9,0 МПа;  $Va'$  – 320, 400, 500 мкм; содержание полимера в среде – 40 %;

$Ka'$  – 60 %; материал образцов – сталь 38ХГС; количество циклов – 20.

Эксперименты проведены по плану Коно ( $m = 2$ ). Для математической обработки произведено кодирование переменных:  $X_1 = Va'$ ;  $X_2 = S_{\text{зз}}$ ;  $Y_1 = Ra$ ,  $\Delta Ra$ ,  $\Delta D$ . Каждый опыт повторялся шесть раз с рандомизацией во времени.

Для шероховатости Ra обработанной поверхности уравнение регрессии в натуральном выражении имеет вид

$$Ra = -0,079 - 0,00016Va' + 0,034S_{\text{зз}} + 0,0000016Ba'^2 - 0,001S_{\text{зз}}^2 + 0,00001Ba'S_{\text{зз}}$$

График зависимости Ra от  $Va'$  и  $S_{\text{зз}}$  (рис. 3) показывает, что при АЭО средой с  $Va' = 320$  мкм и  $Va' = 400$  мкм уменьшение площади зазора уменьшает величину Ra. Для среды  $Va' = 500$  мкм наблюдается минимум в области  $S_{\text{зз}} = 17,5$  мм<sup>2</sup>.

Это объясняется тем, что при уменьшении величины зазора удельное давление рабочей среды на обрабатываемую поверхность возрастает, но скорость течения потока становится меньше. В данном интервале значений для сред  $Va' = 320$  мкм и  $Va' = 400$  мкм при уменьшении  $S_{\text{зз}}$  снижение скорости потока не влияет столь существенно на производительность обработки как увеличение давления среды в канале. Для рабочей среды дисперсностью  $Va' = 500$  мкм уменьшение зазора ниже показателя  $S_{\text{зз}} = 17,5$  мм<sup>2</sup> значительно снижает расходно-напорные характеристики сдвигового течения, что ухудшает условия обработки. Аналогичная картина наблюдается и для изменения шероховатости поверхности в процессе обработки  $\Delta Ra$ .

Для изменения шероховатости  $\Delta Ra$  уравнение регрессии в натуральном выражении имеет вид

$$\Delta Ra = 1,638 - 0,006Va' + 0,0166S_{\text{зз}} + 0,0000061Ba'^2 - 0,0008S_{\text{зз}}^2 + 0,00006Ba'S_{\text{зз}}$$

Для сред дисперсностью до 400 мкм уменьшение зазора между внутренним телом и обрабатываемой поверхностью увеличивает изменение шероховатости при АЭО. Для сред зернистостью 500 мкм и более при  $S_{\text{зз}} < 17,5$  мм<sup>2</sup> показатель  $\Delta Ra$  уменьшился. Эти среды имеют повышенную жесткость, что вызывает при уменьшении площади зазора снижение скорости потока РС.

Для изменения диаметра обрабатываемого отверстия  $\Delta D$  уравнение регрессии в натуральном выражении выглядит следующим образом:

$$\Delta D = 1,324 - 0,0003Va' - 0,0154S_{\text{зз}} + 0,000003Ba'^2 + 0,0009S_{\text{зз}}^2 - 0,00000003Ba'S_{\text{зз}}$$

График зависимости  $\Delta D$  от  $Va'$  и  $S_{\text{зз}}$  (рис. 4) показывает, что при АЭО средами с  $Va' = 320$  мкм и  $Va' = 400$  мкм уменьшение площади зазора увеличивает величину  $\Delta D$ .

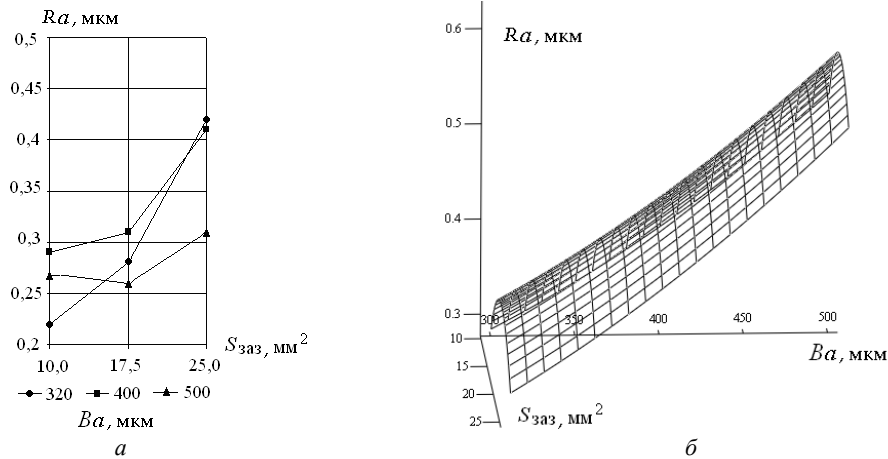


Рис. 3. Зависимость шероховатости  $Ra$  от зернистости  $Ba'$  и площади зазора кольцевой щели  $S_{\text{заз}}$ :  
 а – в декартовой системе координат; б – поверхностный

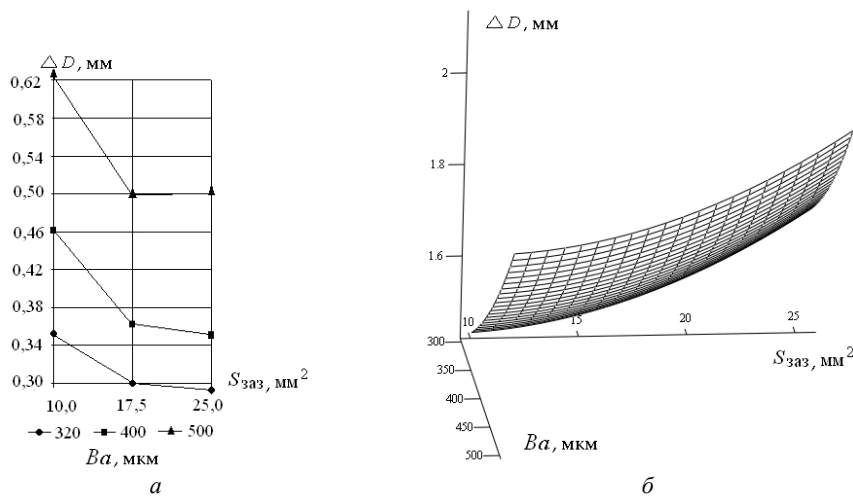


Рис. 4. Зависимость изменения диаметра отверстия  $\Delta D$  от  $Ba'$  и площади зазора кольцевой щели  $S_{\text{заз}}$ :  
 а – в декартовой системе координат; б – поверхностный

Для среды дисперсностью  $Ba' = 500$   $\mu\text{m}$  наблюдается минимум в области  $S_{\text{заз}} = 17,5$   $\text{mm}^2$ . Это объясняется тем, что при уменьшении величины зазора удельное давление среды на обрабатываемую поверхность возрастает, но скорость течения потока становится меньше. В данном интервале значений для сред  $Ba' = 320$   $\mu\text{m}$  и  $Ba' = 400$   $\mu\text{m}$  при уменьшении  $S_{\text{заз}}$  снижение скорости потока не влияет столь существенно на производительность обработки как увеличение давления потока в канале.

Для среды с дисперсностью наполнителя  $Ba' = 500$   $\mu\text{m}$  уменьшение зазора после  $S_{\text{заз}} = 17,5$   $\text{mm}^2$  значительно снижает скорость течения, что ухудшает условия обработки. Применение выравнивающего устройства позволило повысить производительность ( $\Delta Ra$ ,  $\Delta D$ ) и качество (шероховатость  $Ra$  поверхности после обработки) процесса АЭО. Лучшие результаты достигнуты при АЭО средой  $Ba' = 500$   $\mu\text{m}$  с использованием выравнивающего устройства, обеспечивающего площадь зазора  $S_{\text{заз}} = 17,5$   $\text{mm}^2$ .

Для подтверждения экспериментальных результатов и моделирования обработки сопла-насадки спроектировано и изготовлено разъемное приспособление – имитатор внутренней поверхности сопла-насадки (рис. 5). Съемные образцы-вкладыши 5 позволили провести оценку параметров АЭО. Материал образца и имитатора – сталь 38ХГС.



Рис. 5. Приспособление – имитатор сопла-насадки:  
 1 – крышка; 2 – основание; 3 – цилиндрическая часть канала;  
 4 – конусная часть канала; 5 – пазы для съемных образцов

Для реализации изменения режима АЭО от течения в конусе к течению в кольцевой щели спроектированы и изготовлены выравнивающие приспособления (рис. 6). Диаметры приспособлений подобраны так, чтобы обеспечить необходимую площадь поперечного сечения кольцевой щели.



Рис. 6. Выравнивающие устройства, реализующие разную площадь сечения кольцевой щели

На основании результатов предыдущих исследований в качестве основной среды выбрана среда следующего состава: наполнитель – нормальный электрокорунд 18А Ва' = 320 мкм, Ка = 50 %; плотность среды  $\rho = 1410,32 \text{ кг/м}^3$ , количество абразивных зерен  $K_{\text{кз}} = 92,9 \cdot 10^5/\text{кг}$ ; упругие свойства – модуль Юнга  $E = 119 \cdot 10^9$ , величина коэффициента Пуассона  $\mu = 0,411$ . Согласно эмпирической зависимости [6] при  $P_{\text{вх}} = 6 \text{ МПа}$  коэффициент эффективной вязкости  $\eta = 36320 \text{ Па}\cdot\text{с}$ .

Одной из проблем исследований было сравнение расходно-напорных характеристик потока среды в цилиндрической части канала и кольцевой щели между выравнивающим приспособлением и внутренней поверхностью конусной части канала. Для этого рассчитаны расход потока среды (табл. 1) и градиента скоростей  $\gamma$  (табл. 2) на стенке в цилиндрическом и кольцевом каналах.

Таблица 1

**Отношение расходов РС в цилиндрическом канале и кольцевой щели**

Индекс течения $n$	Расход РС $Q, \text{ м}^3/\text{с}\cdot 10^{-5}$		$Q_{\text{цил}} / Q_{\text{кол}}$
	$Q_{\text{цил}}$	$Q_{\text{кол}}$	
1	0,70	0,11	6,4

Таблица 2

**Отношение пристеночных градиентов скоростей РС в цилиндрическом канале и кольцевой щели**

Индекс течения $n$	Пристеночный градиент скорости потока		$\gamma_{\text{цил}} / \gamma_{\text{кол}}$
	$\gamma_{\text{цил}}$	$\gamma_{\text{кол}}$	
1	4,57	3,80	1,2

Размеры каналов подбирались из условия равенства площадей их поперечных сечений  $S_{\text{цил}} = S_{\text{кол}}$ . Цилиндрический канал насадка имеет радиус  $R = 0,0125 \text{ м}$ . Следовательно площадь его поперечного сечения  $S_{\text{цил}} = 0,00049 \text{ м}^2$ . Для кольцевой щели требуемое усло-

вие соблюдается при радиусе отверстия  $R_{\text{отв}} = 0,0156 \text{ м}$  и радиусе выравнивающего устройства  $R_{\text{уст}} = 0,0094 \text{ м}$ .

Расход в кольцевой щели меньше, чем в цилиндрическом канале в 6,4 раза, а пристеночный градиент давлений в 1,2 раза. Чтобы уравнивать расход и пристеночный градиент для обоих каналов необходимо для кольцевой щели увеличить площадь зазора  $S_{\text{кол}}$  в 1,2...6,4 раза, по сравнению с рассмотренной выше и равной площади цилиндрического канала  $S_{\text{цил}} = 0,00049 \text{ м}^2$ . Увеличение площади зазора между обрабатываемой конусной поверхностью и выравнивающим приспособлением в 1,2 раза обеспечило равные расходы в кольцевом и цилиндрическом каналах.

Для дальнейшей обработки применено выравнивающее устройство, обеспечивающее  $S_{\text{кол}} = 17,5 \text{ мм}^2$ . Контролируемыми параметрами были Ra,  $\Delta Ra$  и  $\Delta h$ . Измерение данных параметров произведено после 5, 10, 15, 20, 25 и 30 циклов обработки. Количество обработанных образцов – 6. Требуемая величина шероховатости поверхности Ra = 0,32 мкм достигнута за 20 циклов обработки как в цилиндрической части, так и в конусной части канала. Съём металла составил 0,015 мм на сторону. Дальнейшая обработка позволила через 10 циклов обеспечить шероховатость Ra = 0,22 мкм при съеме металла 0,19 мм на сторону.

Исходное состояние поверхности образца перед АЭО приведено на рис. 7.

На образце (рис. 7, а) шероховатость поверхности не имеет доминирующей ориентации. Параметры исходной шероховатости Ra  $\approx 0,85 \text{ мкм}$ . Увеличенное изображение состояния поверхности (рис. 7, б) этого позволяет визуально наблюдать раковины протяженностью 20...200 мкм, расположенные хаотично. На поверхности наблюдаются риски, расположенные перпендикулярно основному направлению потока среды при АЭО. Ширина рисков составляет 5...30 мкм, протяженность – по всей ширине образца.

Состояние поверхности образца после 15 циклов АЭО представлено на рис. 8.

На образце (рис. 8, а) шероховатость поверхности приобрела доминирующее направление, совпадающее с направлением потока среды. Измеренная величина шероховатости Ra  $\approx 0,31 \text{ мкм}$ . Структура поверхности изменилась. При увеличении в 63 раза (рис. 8, б) видно, что структура поверхности после обработки стала однородной. Раковины отсутствуют. Однако видны перпендикулярные риски.

При увеличении в 125 раз (рис. 8, в) видно, что структура шероховатости проявляется более отчетливо. Она представлена комплексом рисков двух типов. Первый тип рисков имеет ширину 1...5 мкм и глубину 1...3 мкм. Второй тип рисков имеет ширину 5...15 мкм и глубину 3...8 мкм. Протяженность рисков обоих типов от 100 мкм. На обработанной поверхности не обнаружены микровыступы различных включений или следы шаржирования абразивным зерном.

Состояние поверхности образца после 30 циклов АЭО приведено на рис. 9.

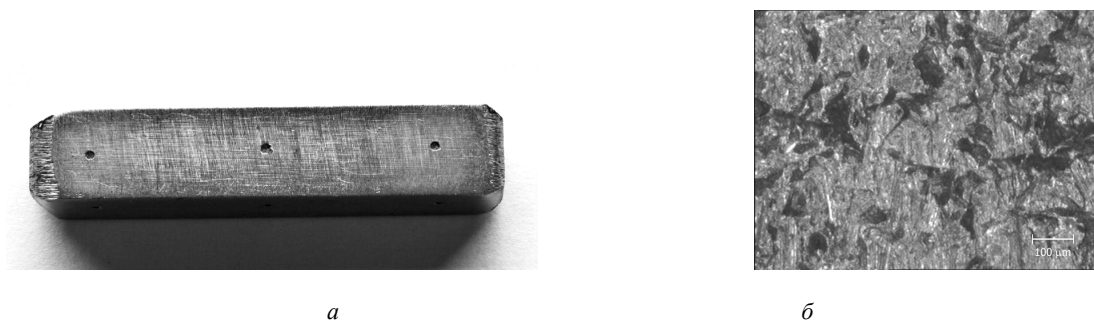


Рис. 7. Исходное состояние поверхности образца перед АЭО:  
*a* – образец; *б* – увеличение в 63 раза

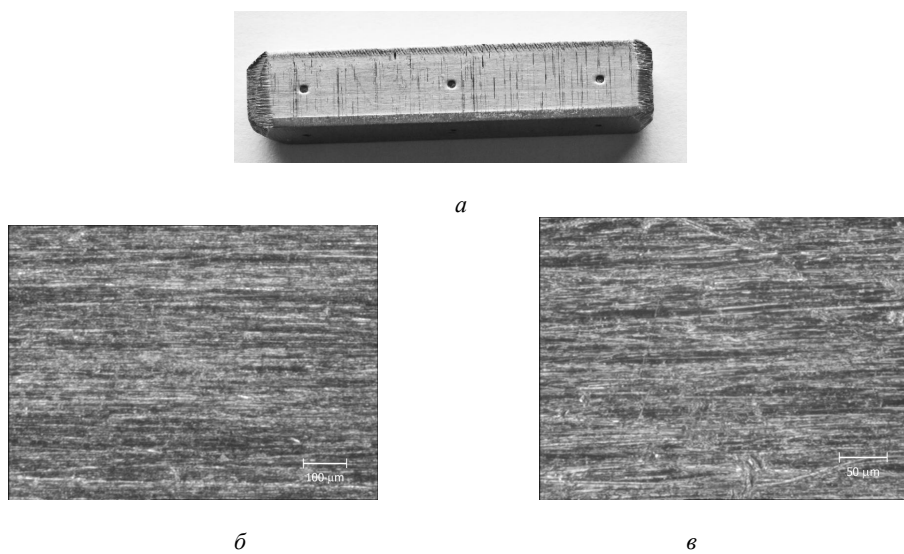


Рис. 8. Состояние поверхности образца после 15 циклов АЭО:  
*a* – образец; *б* – увеличение в 63 раза; *в* – увеличение в 125 раз

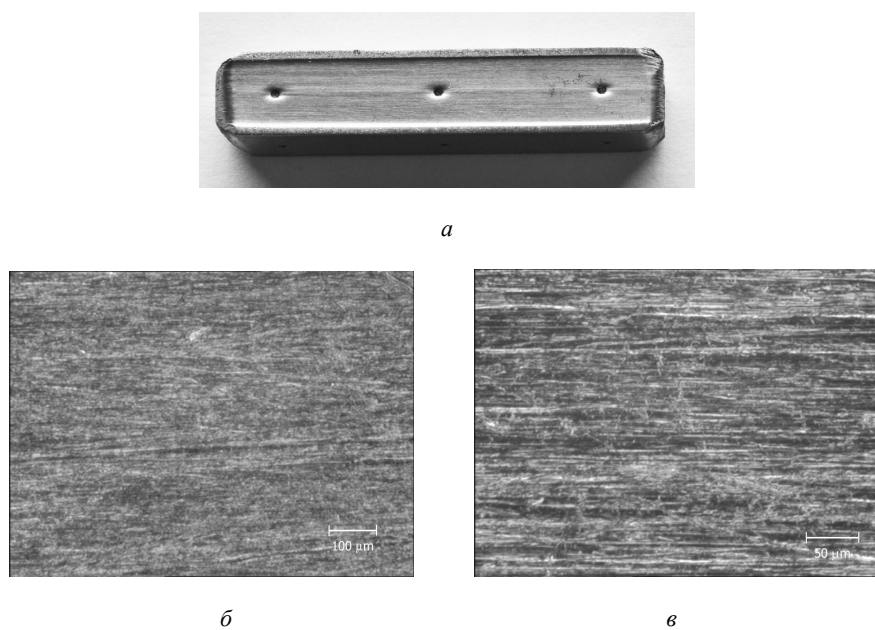


Рис. 9. Состояние поверхности образца после 30 циклов АЭО:  
*a* – образец; *б* – увеличение в 63 раза; *в* – увеличение в 125 раз



На образце (рис. 9, а) шероховатость снова пре-терпела изменения. Измеренная величина шерохова-тости  $R_a \approx 0,22$  мкм. При увеличении в 63 раза (рис. 9, б) видно, что структура шероховатости также представлена комплексом рисок двух типов. Однако протяженность рисок второго типа существенно уменьшилась. Это заметно при рассмотрении изобра-жения образца с увеличением в 125 раз (рис. 9, в). Протяженность рисок первого типа осталась более 100 мкм. Протяженность рисок второго типа состави-ла 20...50 мкм.

Перпендикулярные риски не наблюдаются. Видны микродефекты материала основного слоя металла, выраженные в виде нитевидных включений. Эти вклю-чения наблюдаются в центре фотографий (рис. 9, в). На обработанной поверхности не обнаружены следы шаржирования АЗ.

Использование выравнивающего устройства при обработке конусных каналов обеспечило равномер-ную шероховатость обработанной поверхности за счет изменения характера течения, т. е. перехода от течения в местном сопротивлении (конусе) к течению в кольцевой щели с постоянным сечением.

Абразивно-экструзионной обработкой с примене-нием выравнивающего устройства позволило обеспе-чить равномерную шероховатость в каналах с пере-менной формой поперечного сечения. Ограничением по величине шероховатости и числу используемых циклов АЭО является допуск на финишную обра-ботку.

В результате исследований процесса АЭО каналов с переменной формой сечения была подана заявка на

патент Российской Федерации «Способ абразивно-экструзионной обработки канала, выполненного в форме цилиндра переходящего в конус».

#### Библиографические ссылки

1. Левко В. А. Особенности реологии рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке // Вестник СибГАУ. Вып. 7. 2005. С. 96–100
2. Левко В. А., Пшенко Е. Б. Влияние состава ра-бочей среды на технологические режимы абразивно-экструзионной обработки сложнопрофильных деталей // Вестник СибГАУ. Вып. 11. 2006. С. 64–68
3. Левко В. А. Модель течения рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке тонких осесим-метричных каналов большой длины // Вестник Чебоксар. гос. пед. ун-та : сб. науч. тр. ; Чувашск. гос. педаг. ун-т. Чебоксары, 2008. № 2. С. 85–94.
4. Левко В. А. Расчет шероховатости поверхности при абразивно-экструзионной обработке на основе модели контактных взаимодействий // Авиационная техника. Известия вузов / под ред. проф. В. А. Фирсо-ва ; Казан. гос. техн. ун-т. 2009. № 1. С. 59–62.
5. Исследование влияния формы обрабатываемого канала на течение рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке / В. А. Левко, М. А. Лубнин, П. А. Снетков и др. // Вестник СибГАУ. Вып. 4 (25). 2009. С. 138–145
6. Экспериментальное определение коэффициентов вязкости, упругости и пластичности рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке / П. А. Снетков, В. А. Левко, М. А. Лубнин, Е. Б. Пшенко // Вестник СибГАУ. Вып. 4 (25). 2009. С. 134–138.

V. A. Levko, P. A. Snetkov, E. B. Pshenko

#### RESEARCH OF ABRASIVE FLOW MACHINING PROCESS CHANNELS WITH VARIABLE CROSS SECTION AREA

*The medium flow investigations in the annular gap have been completed. The degree influences of cross-sectional area of the slit and the medium for the processing parameters was found. The recommendations on the use of leveling devices developed.*

*Keywords: abrasive flow machining, annular gap, medium, cross-sectional area, leveling device.*

© Левко В. А., Снетков П. А., Пшенко Е. Б., 2011