

7. Chen, Y. F. Surface effects on angular distributions in X-ray-photoelectron spectroscopy / Y. F. Chen // Surf. Sci. 2002. Vol. 519. P. 115–124.

8. Ritchie, R. H. Electron excitation and optical potential in electron microscopy / R. H. Ritchie, A. Howie // Philos. Mag. 1977. Vol. 36, № 2. P. 463–481.

9. Tougaard, S. Inelastic-electron-scattering cross sections for Si, Cu, Ag, Au, Ti, Fe, and Pd / S. Tougaard, J. Kraaer // Phys. Rev. B. 1991. Vol. 43, № 2. P. 1651–1661.

10. Yubero, F. Dielectric loss function of Si and SiO₂ from quantitative analysis of REELS spectra / F. Yubero [et al.] // Surf. Interface Anal. 1993. Vol. 20. P. 719–726.

11. Кущенко, С. А. Компьютерное моделирование спектров потерь отраженных неупруго рассеянных электронов / С. А. Кущенко, Г. А. Александрова, А. С. Паршин // Сб. тр. X регион. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых по физике полупроводниковых, диэлектрических и магнитных материалов (26–29 апр. 2006, г. Владивосток); ИАПУ ДВО РАН. Владивосток, 2006. С. 65–68.

12. Tougaard, S. Differential inelastic electron scattering cross sections from experimental reflection electron-energy-loss spectra: Application to background removal in electron spectroscopy / S. Tougaard, I. Chorkendorff // Phys. Rev. B. 1987. Vol. 35, № 13. P. 6570–6577.

S. A. Kuschenkov, A. S. Parshin, G. A. Alexandrova, S. A. Hodenkov

COMPUTER MODELING OF INELASTIC-SCATTERING CROSS SECTIONS OF ELECTRONS IN THREE LAYERED STRUCTURES TYPES: «FILM–INTERFACE–SUBTRACT»

In this work we have briefly presented a possible computer program for modeling inelastic-scattering cross sections of electrons in three layered structures types: film/ interface/ subtract. The influence of film and subtract elements distribution on the interface and type of film growth on energy losses for the structure «Fe/Fe–Si/Si» is studied.

Keywords: inelastic-scattering cross section of electrons, layered structures.

© Кущенко С. А., Паршин А. С., Александрова Г. А., Ходенков С. А., 2009

УДК 621.924

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЯЗКОСТИ, УПРУГОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ ПРИ АБРАЗИВНО-ЭКСТРУЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ*

Установлены численные значения коэффициентов вязкости, упругости и пластичности рабочей среды. Выявлены экспериментальные зависимости вязкости и упругости среды от степени ее наполнения и зернистости абразивных зерен.

Ключевые слова: абразивно-экструзионная обработка, реологические характеристики, вязкоупругая среда, способность к пластическим деформациям, абразивные частицы, скорость сдвига.

Одним из новых видов обработки является абразивно-экструзионная обработка (АЭО), заключающаяся в снятии слоя материала с поверхности обрабатываемого канала при перепрессовывании под давлением через него рабочей среды, состоящей из вязкоупругого основания, наполненного твердыми рабочими элементами (чаще всего – абразивные или алмазные зерна).

Процесс АЭО является сложным. При его реализации возникает целый ряд физических явлений, влияющих на качество и производительность обработки. Для внедрения абразивно-экструзионной обработки в производство конкретных деталей необходимо провести достаточ-

но большой объем экспериментальных исследований, связанных с определением оптимального состава рабочей среды и режимов ее перепрессовывания, обусловленными физико-механическими и геометрическими характеристиками обрабатываемых каналов. Такие исследования требуют значительных затрат, составляющих до 60 % от общих затрат на внедрение этой технологии в производство.

Основными параметрами технологического процесса абразивно-экструзионной обработки являются объем рабочей среды, давление гидравлической системы установки в продавливающем и принимающем рабочем ци-

*Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. № 1121.

линдре установки для АЭО, величина (дисперсность) и процентное содержание (концентрация) абразивного зерна в рабочей среде, его физико-механические характеристики, а также количество циклов обработки. Большое влияние на качество и производительность процесса оказывают геометрические характеристики обрабатываемого канала – его радиус и длина, площадь и периметр поперечного сечения, а также исходные физико-химические свойства поверхностного слоя.

Режущая способность рабочей среды как абразивно-инструмента зависит от условий течения в обрабатываемом канале и ее вязкоупругих и пластичных свойств. Вязкие и пластичные свойства определяют ее текучесть, упругие свойства – жесткость. Для проведения теоретических расчетов характеристик потока рабочей среды при АЭО необходимо экспериментально установить зависимости эффективной вязкости η , коэффициента Пуассона и модуля Юнга рабочей среды от степени ее наполнения и дисперсности абразивного зерна.

Характеристики рабочей среды зависят от степени наполнения полимерной основы (концентрации Ka абразивных зерен в среде), их величины (зернистости Ba), а также давления в подающем цилиндре $P_{вх}$.

При изменении Ka и Ba , изменяется не только плотность среды и ее вязкость, но и ее реологические характеристики – коэффициенты касательных и нормальных напряжений, скорость потока и скорость сдвига, а также все кривые зависимостей течения сдвига от напряжения сдвига.

Поскольку характер вязкого течения среды при абразивно-экструзионной обработке в круглом канале большой длины подобен течению жидкости в капиллярном вискозиметре, для исследования ее вязких свойств разработан аналогичный метод, основанный на экспериментальном установлении величин максимальной скорости потока ω_{max} и перепада давлений ΔP на участке цилиндрического канала длиной L и диаметром d . При подстановке полученных экспериментальных значений ω_{max} и ΔP в преобразованную формулу Пуайзеля при известных L и d , определена величина эффективной вязкости η

$$\eta = \frac{\Delta P}{\omega_{max}} \cdot \frac{R^2}{8 \cdot L}.$$

Для регистрации параметров применена измерительная система разработанного комплекса для исследований. Эксперименты проведены на экспериментальной установке УЭШ-25 с применением специального приспособления (рис. 1).

Приспособление состоит из стального корпуса 1, подвергнутого термообработке, с круглым каналом 2 диаметром 25 мм, совпадающим с диаметром рабочих цилиндров 3 и 4 установки – УЭШ-25, с датчиками давления 5 и 6, а также температурным датчиком 7.

На осциллограмме (рис. 2) регистрируется изменение давления в текущий момент времени в сечениях датчика 5 (P_1) и 6 (P_2).

Время определено на осциллограмме по задаваемому шагу отсечки $t_{ц} = 0,2$ с. На линии P_1 выявляют точку начала отклонения от нулевого уровня показаний 1. Аналогично находят начало появления давления среды в точ-

ке 2 для линии P_2 . Через найденные точки 1 и 2 проводят вертикальные линии к линиям P_1 и P_2 соответственно. Расстояние $t_{ц}$ между нормальными соответствует минимальному времени течения среды от сечения датчика 5 к сечению датчика 6. По известному расстоянию между сечениями ($L = 0,07$ м) и $t_{ц}$, рассчитывают максимальную скорость потока ω_{max} на этом участке. Далее находят точку 3, которая является пересечением нормали через точку 2, лежащей на линии P_2 , и точку 4 линии P_1 .

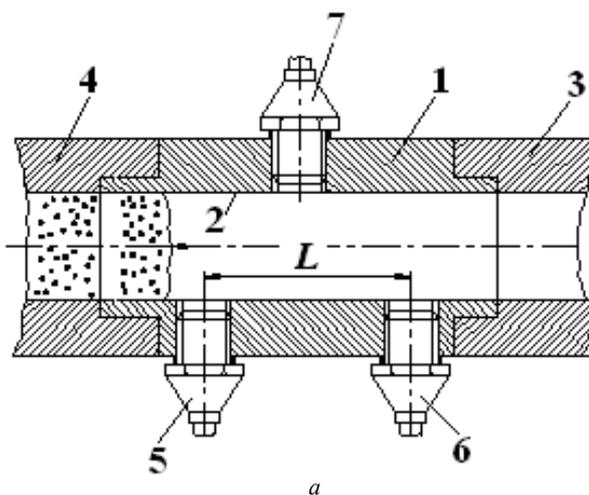


Рис. 1. Устройство для исследования вязких и пластичных свойств: а – схема; б – корпус устройства с двумя переходниками

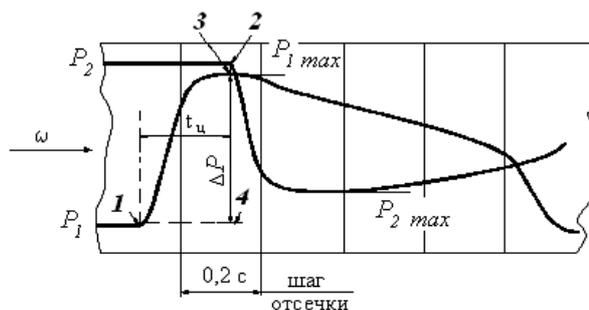


Рис. 2. Схема регистрации данных на осциллограмме

Точные значения физических величин $t_{ц}$ и ΔP рассчитаны с учетом тарировки датчиков и величины шага от-

сечки t_c . Разность давлений между двумя сечениями $\Delta P = P_1 - P_2$ равна расстоянию между точками 3 и 4 на осциллограмме, умноженному на масштаб тарировки. Для каждого условия эксперимента проведено по шесть опытов с рандомизацией по времени и контролем температуры среды.

Исследование зависимости коэффициента η от Ba и $P_{вх}$ проведены по плану Коно ($m = 2, n = 3$). Для математической обработки произведено кодирование переменных $X_1 = Ba; X_2 = P_{вх}; Y_1 = \eta$. Варьируемыми факторами были зернистость Ba и величина давления $P_{вх}$. Каждый опыт повторялся шесть раз с рандомизацией во времени. Условия опытов по девяти режимам и результаты экспериментов приведены в табл. 1.

В результате исследований установлено, что чем выше степень наполнения полимерной основы рабочей среды абразивом, тем выше ее эффективная вязкость. При равном весовом наполнении Ka абразивами различной зернистости Ba больший коэффициент η наблюдается при наполнении абразивами меньшей величины.

Увеличение $P_{вх}$ при экструзии среды улучшает условия обработки за счет возрастания напряжения сдвига и скорости потока среды и градиента скорости.

Модуль Юнга и коэффициент Пуассона характеризуют упругие свойства рабочей среды. Упругие характеристики среды зависят от степени их наполнения Ka и дисперсности наполнителя Ba . Численные значения этих показателей требуются при расчете контакта рабочей среды с обрабатываемой деталью и оцениваются по изменению длины $l - l'$ и диаметра $d' - d$ образца среды при его сжатии нагрузкой F (рис. 3).

Направляющие оси 5 установлены в бронзовые втулки основания 2 приспособления с натягом, а во втулки весовой планки 3 – со скользящей посадкой. Образец рабочей среды формируется в рабочем цилиндре экспериментальной установки УЭШ-25, устанавливаемом в определенном положении, что позволяет обеспечить его стабильные размеры. Номинальный диаметр образца до деформации $d = 25$ мм, номинальная длина образца до деформации $l = 50$ мм. Площадь поперечного сечения образца $S_{обр} = 0,00049$ м². Измерение размеров образца проводилось при помощи штангенциркуля и микрометра.

Масса весовой планки и дополнительного груза подбирались таким образом, чтобы образец деформировался преимущественно упруго и выполнялась линейная зависимость изменения его размеров от приложенной

нагрузки. Общая масса составила 150 гр. Время выдержки составило 3...10 с.

Исходя из определений модуля Юнга E и коэффициента Пуассона μ возможно экспериментально определить их величины:

$$F = \frac{m_{нар}g}{S_{обр}} = E \frac{l-l'}{l} \text{ и } \mu = \frac{(d-d')/d}{(l-l')/l},$$

где $m_{нар}$ – масса приложенной нагрузки.

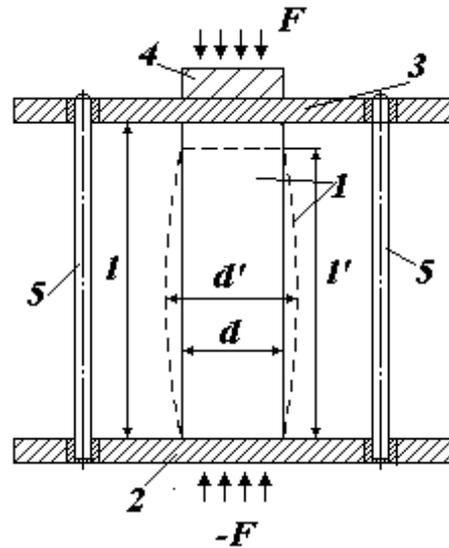
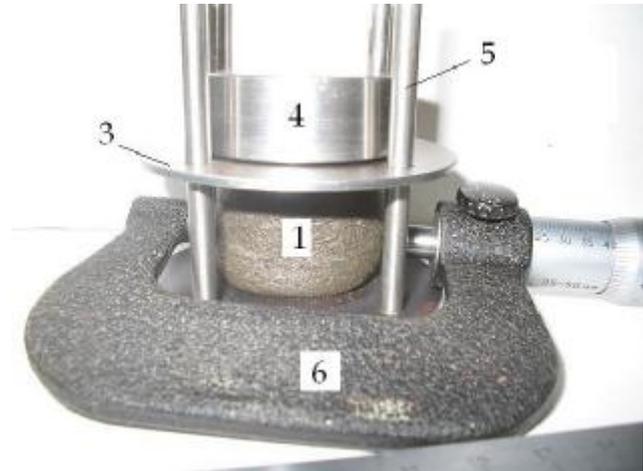


Рис. 3. Приспособление и схема измерения модуля Юнга и коэффициента Пуассона среды: 1 – образец рабочей среды; 2 – основание приспособления; 3 – весовая планка; 4 – дополнительный груз; 5 – направляющие оси; 6 – микрометр

Таблица 1

Зависимость η от Ba и величины входного давления $P_{вх}$

№ п/п	Ba , мкм	$P_{вх}$, МПа	η , Па·с
1	300	9,0	36 892
2	400	9,0	36 093
3	500	9,0	29 215
4	300	7,5	32 368
5	400	7,5	30 402
6	500	7,5	23 204
7	300	6,0	27 283
8	400	6,0	24 166
9	500	6,0	16 223

Результаты исследований зависимости модуля Юнга рабочих сред от степени наполнения и величины абразивного наполнителя приведены в табл. 2.

Экспериментально установлено (рис. 4), что при увеличении Ka более чем на 80 %, закрепленность абразива в полимерной основе среды существенно уменьшается. Это явление приводит к потере текучести среды и выпадению зерен из полимерной основы, что существенно ухудшает условия абразивно-экструзионной обработки. Поэтому данный показатель был принят за граничное условие максимальной степени наполнения. Величина коэффициента Пуассона m полимерной основы без абразивного наполнителя 1,34, для наполненных сред его экспериментально измеренная величина колеблется в интервале 0,4...0,42.

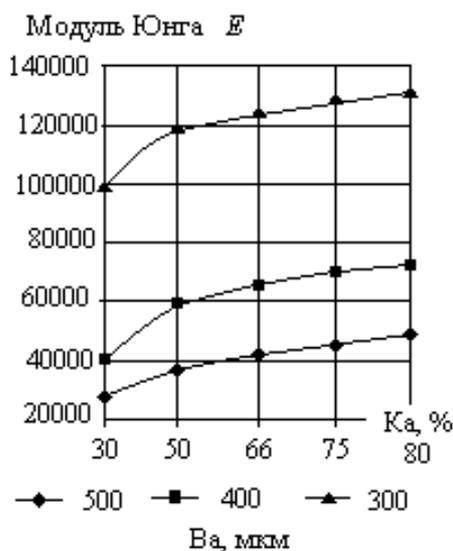


Рис. 4. Зависимость модуля Юнга рабочей среды от степени наполнения абразивными зёрнами и величины абразивного наполнителя

Модуль Юнга E возрастает при увеличении степени наполнения и уменьшении дисперсности абразивных зе-

рен. Этот эффект объясняется с помощью преобразованной модели Каргина–Слонимского–Рауза [1], описывающей рабочую среду как вязкопластичную среду, наполненную упругими цепочками, образованными абразивными зёрнами и полимерной основой.

В полимерной основе без наполнителя цепочки абразивных зёрен отсутствуют. Уменьшение дисперсности наполнителя при одинаковом массовом наполнении приводит к возрастанию количества абразивных зёрен в среде. Чем больше количество абразивных зёрен в среде, тем больше в среде возникает цепочек, длина сегментов которых, в свою очередь, уменьшается. Более короткие сегменты цепочки обуславливают ее повышенную упругость и вязкость. Пластичность среды при этом снижается.

Для оценки режущих свойств исследуемых рабочих сред использован метод симплексов с аналогичными исходными данными и ограничениями, составом среды и $P_{вх}$. Результаты экспериментальных исследований абразивно-экструзионной обработки показали, что оптимальная режущая способность, оцениваемая по величине шероховатости поверхности после обработки или ее изменения в процессе обработки ΔRa , величине снятого слоя материала Δh , достигается при использовании такого состава рабочей среды, в котором упругость среды максимальна. Коэффициенты вязкости и пластичности при этом используются для задания граничных условий абразивно-экструзионной обработки конкретной детали. Численные показатели вязкости, упругости и пластичности рабочей среды зависят от геометрических характеристик обрабатываемого канала и требований к состоянию поверхностного слоя детали.

Таким образом, разработанная методика позволила экспериментально определить скорость потока ω_{max} и величину коэффициента эффективной вязкости η рабочей среды различных составов при абразивно-экструзионной обработке, который можно использовать для расчета напорно-расходных характеристик среды в обрабатываемом канале.

Таблица 2

Упругие характеристики рабочих сред

Средняя дисперсность $Ba, \mu m$	Весовое наполнение $Ka, \%$	Модуль Юнга	Коэффициент Пуассона
0	0	22 760	1,34
320	30	97 955	0,411
320	50	119 600	0,411
320	66	124 300	0,411
320	75	128 250	0,411
320	80	132 500	0,411
400	30	40 480	0,40
400	50	59 200	0,40
400	66	65 100	0,40
400	75	70 400	0,40
400	80	73 100	0,40
500	30	27 000	0,42
500	50	37 000	0,42
500	66	42 000	0,42
500	75	46 000	0,42
500	80	51 000	0,42

Установлена степень влияния наполнения абразивом Ka , величины Va абразивных зерен и входного давления $P_{вх}$ на вязкие, упругие и пластичные свойства среды. С возрастанием $P_{вх}$ и содержания абразива в среде Ka среды коэффициенты η увеличиваются. Это обусловлено тем, что при увеличении скорости сдвига более интенсивно разрушается пространственная структура среды. При этом эффективная вязкость, касательные и нормальные напряжения становятся больше. Так, для среды зернистостью $Va = 400$ мкм при входном давлении $P_{вх} = 6$ МПа коэффициент $\eta = 24\ 166$ ПаС, а при $P_{вх} = 9$ МПа коэффициент $\eta = 36\ 093$ ПаС, т. е. увеличился на 65...70 %.

Экспериментальное определение коэффициентов вязкости, упругости и пластичности позволяет проводить теоретические расчеты точности, производительности и качества абразивно-экструзионной обработки. Полученные численные значения показателей упруго-вязко-пластической среды позволяют осуществить выбор вида контакта абразивных зерен [2]. Установив вид контакта, можно по предложенным методикам [3; 4] рассчитать производительность АЭО и шероховатость обработанного поверхностного слоя детали.

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

EXPERIMENTAL DETERMINATION FACTOR OF VISCOSITY, ELASTICITY, AND PLASTICITY MEDIA FOR ABRASIVE FLOW MACHINING PROCESSING

The numerical values of viscosity, elasticity and plasticity factors in media have been established. Experimental dependence of viscosity and elasticity environments on the degree of its filling and abrasive grains' granularity is revealed.

Keywords: abrasive flow machining, rheological characteristics, viscoelastic media, flowable abrasive particles, shear rate.

© Снетков П. А., Левко В. А., Пшенко Е. Б., Лубнин М. А., 2009

УДК 621.924

В. А. Левко, М. А. Лубнин, П. А. Снетков, Е. Б. Пшенко, Д. М. Турилов

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ОБРАБАТЫВАЕМОГО КАНАЛА НА ТЕЧЕНИЕ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ ПРИ АБРАЗивно-ЭКСТРУЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ*

Проведены визуальные исследования характера потока рабочей среды как абразивного инструмента. Установлена степень влияния формы обрабатываемого канала и местных сопротивлений на особенности течения. Разработаны рекомендации по выравниванию условий обработки.

Ключевые слова: абразивно-экструзионная обработка, повышение качества поверхности, течение абразивной рабочей среды, визуальные исследования, местные сопротивления, форма поперечного сечения.

Анализ конструктивных особенностей деталей летательных аппаратов (ЛА) выявил широкую номенклатуру каналов с сечениями различной формы, а также наличие различных местных сопротивлений типа лопатки, выступа и т. п.

Установлено 28 типовых элементов с различной геометрической формой сечения, которые встречаются в деталях ЛА.

Визуальные исследования заключались в фиксации процесса течения рабочей среды (РС) в каналах раз-

* Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. № 1121.