

**Список литературы:** 1. Мур Д. Основы и применения трибоники. – Издательство Мир, 1978. – 487с. 2. Ю.Н.Кипреев. Характеристики гидродинамического режима смазки в контактах поверхностей с изломом. – Збірник наукових праць УДМТУ. – Миколаїв: УДМТУ, 2002. – №6(384). – С.101 – 110. 3. Ю.Н.Кипреев, Т.Ю.Ломаковская. Несущая способность смазочного слоя в контактах плоских поверхностей. – Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонГТУ, 2002. Вып. 20. – С.184-194. 4. Ю.М.Кіпреев. Характеристики мастильного шару в контактах поверхонь із зломом. - Вісник Технологічного університету Поділля, №6, Хмельницький, 2002/Ч.1, С. 135-146. 5. Ю.М.Кіпреев. Аналіз характеристик мастильного шару між ламаними поверхнями. Тези доповідей 8-го Міжнародного симпозіуму українських інженерів-механіків. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД. – 2007. – С. 138-139. 6. Ю.Н.Кипреев. Определение характеристик трения в контакте плоских поверхностей с изломом. – Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2003. Вып. 25. – С.161-166. 7. Ю.Н.Кипреев. Учет боковых утечек в контактах плоских поверхностей с изломом. – Донецк: ДонНТУ, 2004. Т.2. – С.64-68. 8. Орлов П.И. Основы конструирования: Справочно-методическое пособие. В 2-х книгах. Кн. 2. Под редакцией П.Н. Учаева. – 3-е изд., исправленное. – М.: Машиностроение, 1988. – 544с.

Сдано в редакцию 08.05.07

## **ФОРМИРОВАНИЕ РЕГУЛЯРНОГО МИКРОРЕЛЬЕФА УЛЬТРАЗВУКОВЫМ АЛМАЗНЫМ ВЫГЛАЖИВАНИЕМ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ РЕЛАКСАЦИЕЙ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ**

**Киселев Е.С., Степчева З.В., Половников П.А. (УлГТУ, г. Ульяновск, Россия)**

*The results of examination of technological efficiency of different ways of diamond smoothing of the ground work-piece are given. It is set, that a reserve of perfecting of technology diamond smoothing is the ultrasonic relaxation of technological residual stresses in a surface layer. Its application allows to obtain major on quantity and on location depth cramping residual stresses even at smaller gain of a hold-down diamond tool.*

Наряду с обеспечением требуемых физико-механических характеристик рабочих поверхностей деталей, работающих в условиях трения, одной из важнейших технологических задач, решаемых в процессе упрочняющей обработки, является формирование регулярных микрорельефов (РМР), аналитически рассчитываемых и воспроизводимых при обработке с достаточной степенью точности.

Регуляризация поверхностей обрабатываемых заготовок при ультразвуковом (УЗ) алмазном выглаживании, как правило, осуществляется на форсированных режимах при увеличенных значениях амплитуды УЗ-колебаний (УЗК) и продольных подач выглаживателя, что неизбежно влечет за собой рост составляющих сил обработки, вызывающих как увеличение величины упругого восстановления поверхности, так и обратное пластическое течение материала в сторону уже обработанной поверхности [1 – 4]. Эти явления сопровождаются увеличением параметров шероховатости, что делает невозможным образование регулярных микрорельефов без потери качества обработки и зачастую, особенно в случае обработки маложестких прецизионных деталей, оказывается неприемлемым. Необходимым условием обеспечения требуемой микрогеометрии заготовок с одновременным образованием регулярного микрорельефа является снижение величины упругого восстановления поверхности за счет силового воздей-

вия, что может быть эффективно реализовано, например, при ультразвуковом алмазном выглаживании с касательно-осевыми наложениями УЗ-колебаний [3]. Подведение УЗК в зону обработки осуществляется под углом к оси обрабатываемой заготовки (рис. 1), что облегчает смятие микровыступов. При этом снижается сопротивление деформации в 1,1 – 1,3 раза [4] и составляющих силы выглаживания до 60%. Однако, как показывают экспериментальные исследования, формирование РМР при небольших силовых воздействиях характеризуется упругим восстановлением поверхности [5] на величину  $h_y$  [6], что может привести к частичному или полному исчезновению элементов регулярного микрорельефа:

$$\frac{h_y}{h} = \psi \quad (1)$$

где  $F_y$  – площадь поверхности контакта инструмента и заготовки при их упругом взаимодействии,  $m^2$ ;  $F$  – площадь поверхности контакта инструмента и заготовки при их упруго-пластическом взаимодействии,  $m^2$ ;  $h$  – глубина внедрения инструмента при обработке,  $\psi$  – параметр, характеризующий соотношение упругой и полной деформации в контакте [6]:

$$\psi = \frac{3 \cdot HV [(1 - \mu^2)R]^{2/3}}{P^{1/3} E^{2/3} + 2,32 HV [(1 - \mu^2)R]^{2/3}}, \quad (2)$$

где  $E$  – модуль упругости, Па;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $HV$  – твердость поверхности заготовки по Виккерсу, Па.

Увеличить долю пластической деформации в контакте при небольших силах обработки, можно за счет предварительной релаксации растягивающих остаточных напряжений, возникших в процессе предшествующей операции (обычно, обработки шлифованием). Действительно, процесс накопления пластической деформации при алмазном выглаживании происходит в три этапа: снятие остаточных напряжений, дальнейшее накопление пластической деформации и исчерпание ресурса пластичности.

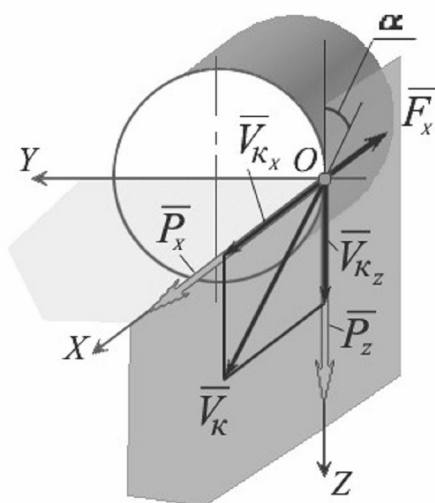


Рис. 1. Схема плоской системы сил в зоне обработки при наложении УЗК в касательно-осевом направлении:  $\bar{V}_{k_x}$  – составляющая вектора скорости приложенных УЗК по оси  $OX$ ;  $\bar{V}_{k_z}$  – составляющая вектора скорости приложенных УЗК по оси  $OZ$ ;  $P_z$ ,  $P_x$  – составляющие силы выглаживания,  $\bar{F}_x$  – составляющая сила трения по оси  $OX$ ;  $\alpha$  – угол между направлением вектора скорости приложенных УЗК и осью  $OZ$

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования технологической эффективности предварительной релаксации технологических

остаточных напряжений для обеспечения возможности формирования на поверхности РМР в виде непересекающихся кольцевых канавок. Формируемый РМР характеризуется осевым шагом, зависящим от подачи и амплитуды УЗК, и углом наклона канавок, определяемым результирующим вектором скорости УЗК и скоростями перемещения инструмента в окружном направлении вращения заготовки и в направлении подачи.

Эффективность формирования РМР оценивали по величине полученной шероховатости поверхности по параметру  $Ra$ , касательной  $Pz$  и осевой  $Px$  составляющей сил выглаживания в зависимости от величины угла  $\alpha$  наклона касательных УЗК к оси обрабатываемой заготовки. Исследования проводили на установке, созданной на базе токарно-винторезного станка УТ16, оснащенной универсальным динамометром УДМ-100, усилителем 8-АНЧ-26М и шлейфовым осциллографом «Нева-МТ». В качестве образцов использовали образцы диаметром 73 мм и длиной 200 мм из коррозионно-стойкой подшипниковой стали 95Х18 и диаметром 53 мм и длиной 160 мм из стали 40Х. В качестве деформирующего инструмента использовался выглаживатель (ИС-290.00.00-04) с радиусом рабочей части алмаза  $R=1,5$  мм.

Среднее арифметическое отклонение профиля поверхности заготовки  $Ra$  измеряли на профилографе-профилометре мод.283 завода «Калибр». Для сравнительного анализа эффективности формирования РМР выглаживание осуществляли с наложением УЗК амплитудой 3, 6, 8, 10, 14 мкм и частотой 18,6 кГц.

Все образцы подготавливали, шлифуя их на круглошлифовальном станке 3Б161 до  $Ra = 0,4 - 0,6$  мкм (режим шлифования: рабочая скорость круга 24А16НС17К11 1х600х40х305 – 35 м/с, окружная скорость заготовки – 35 м/мин, скорость продольной подачи – 0,6 м/мин, врезная подача – 0,01 мм/дв.ход; расход СОЖ (2 %-й раствор Синхо-2М) – 40 дм<sup>3</sup>/мин). Далее половину образцов направляли на ультразвуковую релаксацию остаточных напряжений и затем на операцию алмазного выглаживания, а другую половину образцов обрабатывали без предварительной релаксации напряжений.

На первом этапе исследований выявляли оптимальные сочетания значений амплитуды колебаний ( $A$ , мкм) и угла наложения их на инструмент  $\alpha$  (рис. 1).

Применение касательно-осевых УЗК уже под углом 15 градусов позволяет значительно снизить величину  $Ra$  по сравнению с касательным наложением УЗК (рис. 2). В зависимости от амплитуды УЗК при обработке образцов из стали 95Х18 высота микронеровностей уменьшилась в 2,5 – 5 раза и в 2 раза – из стали 40Х. Причем замечено, что при обработке заготовок из коррозионно-стойкой стали 95Х18 использование меньших (3 – 6 мкм) амплитуд УЗК приводит к формированию меньших значений  $Ra$  (рис. 2, а), а при обработке стали 40Х картина совершенно противоположная – большим значениям амплитуды соответствуют меньшие значения  $Ra$ . Это, по-видимому, объясняется разной величиной сопротивления деформированию, обусловленной различием данных сталей по группам обрабатываемости.

Использование амплитуды УЗК волновода (выглаживателя) порядка 6 – 10 мкм при углах наклона инструмента 15 – 45 ° для образцов из стали 95Х18 имеет примерно одинаковую эффективность, увеличение угла наклона до 60° приводит к некоторому снижению шероховатости (на 8 – 10%). Это подтверждает теоретические предположения о снижении сопротивления пластической деформации при дальнейшем увеличении угла наклона.

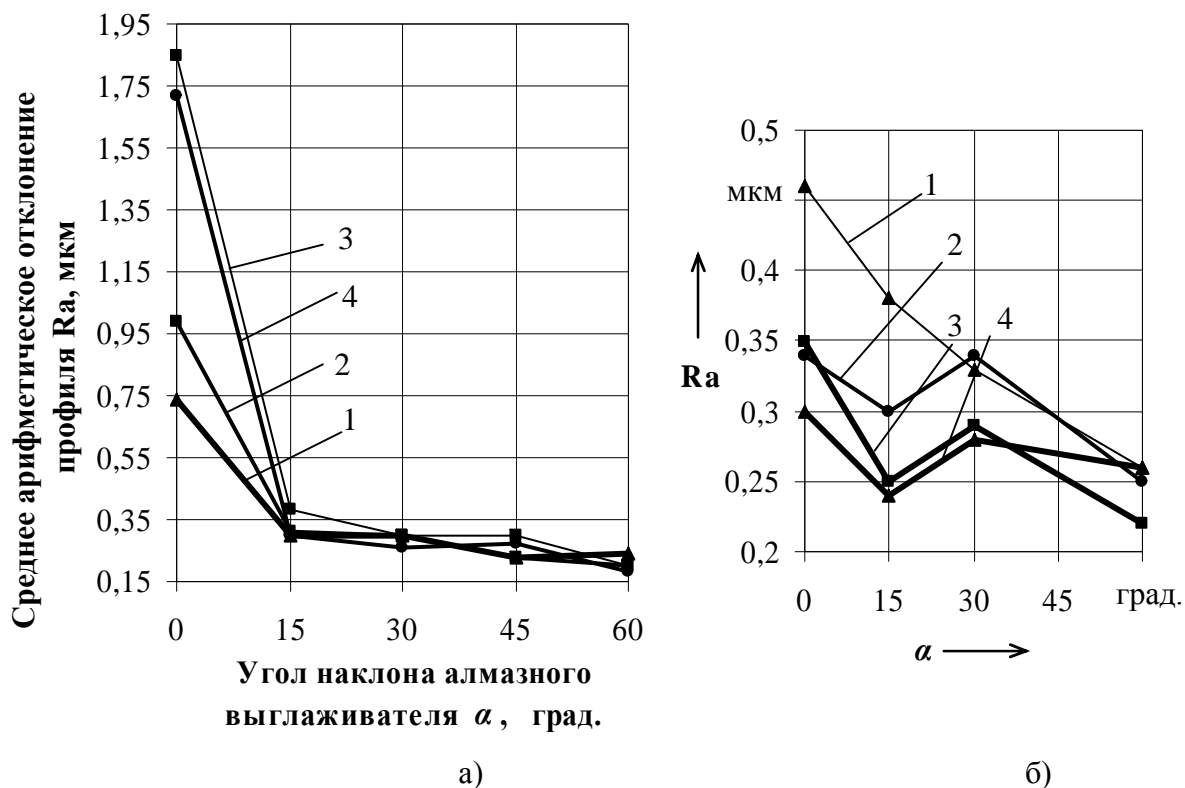


Рис.2. Зависимость среднего арифметического отклонения профиля поверхности  $Ra$  (а) от угла наклона алмазного выглаживателя  $\alpha$  при обработке образцов из коррозионно-стойкой подшипниковой стали 95X18 (а) и стали 40X (б): 1, 2, 3, 4 – амплитуда УЗК, соответственно – 3, 6, 8, 10  $\mu\text{м}$

Те же значения амплитуд при обработке заготовок из стали 40X более эффективны как при касательном ( $\alpha = 0$ ), так и при касательно-осевом наложении УЗК с малыми углами (до  $15^\circ$ ) и обеспечивают снижение  $Ra$  в 1,5 – 2 раза. При углах наклона  $30 - 60^\circ$  величины микронеровностей отличаются незначительно (до 10%). Любопытно, что зависимость шероховатости от угла наклона УЗК при обработке конструкционной стали имеет характерную точку экстремума при  $\alpha = 15^\circ$  (рис. 2, б) при амплитудах порядка 6 – 10  $\mu\text{м}$ . Такого экстремума не обнаружено при использовании малых амплитуд УЗК и при обработке заготовок из стали 95X18. Очевидно, это тоже объясняется особенностями ультразвукового воздействия на материалы различных групп обрабатываемости.

Обработка с углом наклона инструмента  $\alpha = 60^\circ$  и амплитудой 8  $\mu\text{м}$  показала наибольшую эффективность по формированию меньших значений  $Ra$ . Микрорельеф во всех случаях обработки носил иррегулярный характер, что объясняется высокой долей упругой деформации в контакте при небольших силах обработки, а также явлением обратного пластического течения материала в сторону уже обработанной поверхности.

На втором этапе исследовали эффективность предварительной релаксации остаточных напряжений. Для этого заготовки перед алмазным выглаживанием подвергали УЗ-воздействию в течение 3 минут с амплитудой колебаний волновода – 5  $\mu\text{м}$  и частотой – 18,6 кГц [7].

Анализ результатов выполненных экспериментальных исследований показал, что предварительная релаксация остаточных напряжений позволяет уменьшить силовую напряженность алмазного выглаживания образцов из стали 95X18 и 40X, соответственно, на 10 – 15 % и 15 – 20 % (рис. 3, 4). При этом отмечено, что меньшие значения составляющих сил выглаживания достигаются уже при использовании амплитуды 8 мкм, а не 10 мкм, как это наблюдалось при обработке без предварительной релаксации остаточных напряжений.

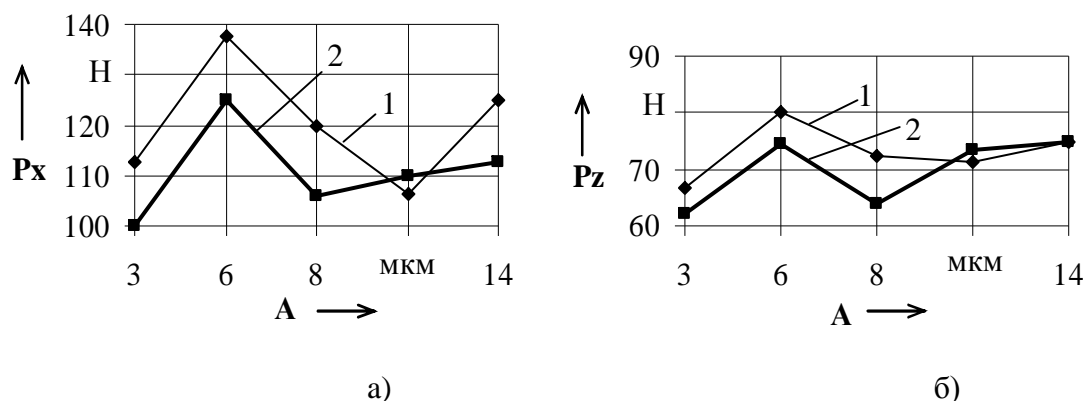


Рис. 3. Зависимость осевой  $P_x$  (а), касательной  $P_z$  (б) составляющих силы выглаживания от величины амплитуды УЗК при обработке образцов из коррозионно-стойкой стали 95X18:  $V = 40$  м/мин,  $P = 60$  Н,  $S = 0,36$  мм/об, радиус алмазного выглаживателя  $R = 1,5$  мм; 1 – без предварительной релаксации остаточных напряжений, 2 – с предварительной релаксацией остаточных напряжений

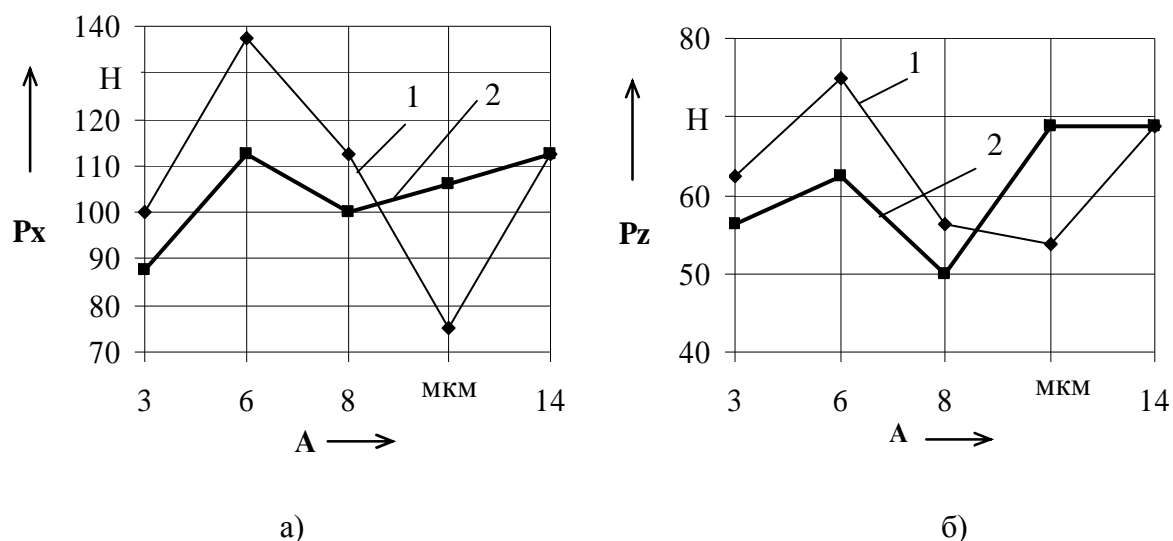


Рис. 4. Зависимость осевой  $P_x$  (а), касательной  $P_z$  (б) составляющих силы выглаживания от величины амплитуды УЗК при обработке образцов из стали 40X:  $V = 52$  м/мин,  $P = 60$  Н,  $S = 0,62$  мм/об, радиус алмазного выглаживателя  $R = 1,5$  мм; 1 – без предварительной релаксации остаточных напряжений, 2 – с релаксацией остаточных напряжений

Использование амплитуды УЗК волновода (выглаживателя) 6 мкм сопровождалось нежелательным ростом составляющих сил выглаживания (на 15 – 20 %). При ам-

плитудах 10 мкм величины  $R_x$  и  $R_z$  примерно одинаковы, однако в случае предварительной релаксации остаточных напряжений образованный микрорельеф обработанной поверхности носит регулярный характер (рис. 5, а). Это подтвердило предположение о возможности использования ресурса релаксации остаточных напряжений от предварительной обработки для повышения доли пластической деформации в контакте из-за снижения сопротивления пластической деформации.

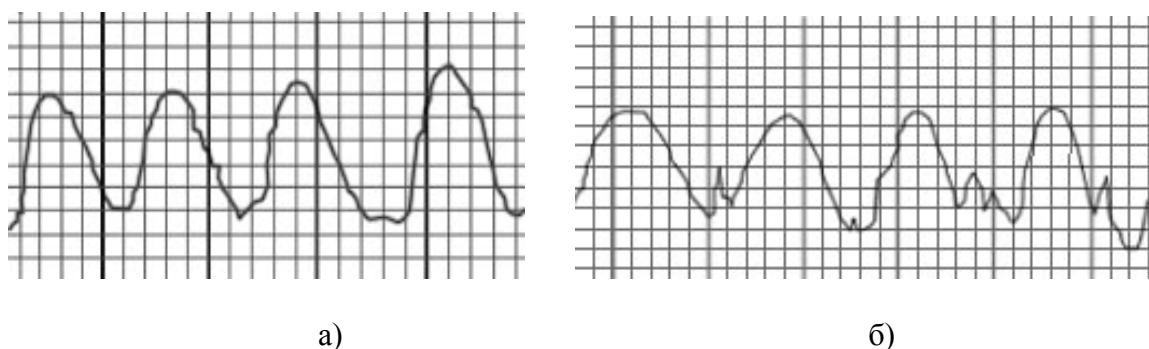


Рис. 5. Профилограмма регулярного микрорельефа на поверхности образцов из стали 95X18 (а, б) и 40X (в, г) после ультразвукового АВ с предварительной релаксацией остаточных напряжений: в.у. 1000X, г.у. 200X; а) – с амплитудой 10 мкм, б) – с амплитудой 14 мкм

Дальнейшее увеличение амплитуды УЗК до 14 мкм приводит к формированию более выраженного микрорельефа (рис. 5, б). Однако при этом наблюдается рост как составляющих сил обработки (рис. 4), так и шероховатости поверхности (по  $R_a$ ). Для визуальной иллюстрации полученного микрорельефа были сделаны фотографии на биологическом микроскопе с для образцов из стали 95X18 (рис. 6, а, б) и 40X (рис. 6, в, г).

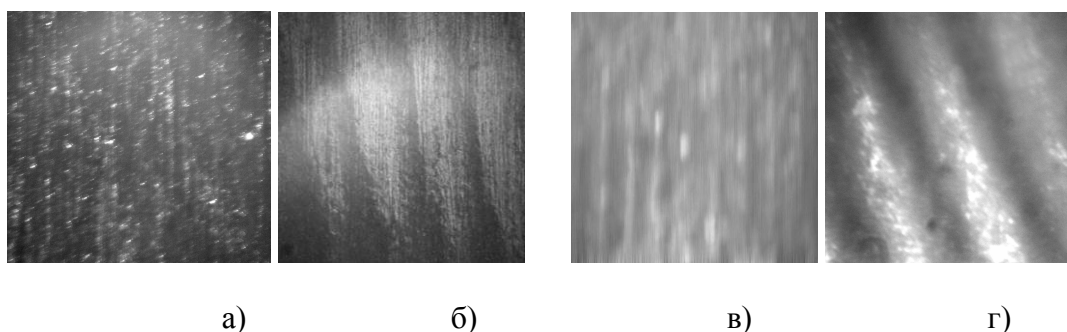


Рис. 6. Микрорельеф обработанной поверхности на образцах из стали 95X18ШТ (а,б) с увеличением в 100 раз и стали 40X (в, г) с увеличением в 63 раза: а, в – после АВ без предварительной релаксации; б, г – после АВ с предварительной релаксацией остаточных напряжений

Как и ожидалось, полученный микрорельеф представляет собой равномерную последовательность канавок на обработанной поверхности (см. рис. 6). В соответствии с назначенным режимом обработки шаг и угол винтовой линии образованных канавок составили 1,5 мкм и  $75^\circ$  для образцов из стали 95X18 и 5,5 мкм и  $60^\circ$  из стали 40X. Этого оказывается вполне достаточным для создания благоприятных условий циркулирования смазки и повышения эксплуатационных характеристик обработанных деталей в целом.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований подтвердили предположения о роли наследуемых от предварительной обработки технологических остаточных напряжений в процессе упруго-пластического контакта и положительное влияние их предварительной релаксации в образовании регулярного микрорельефа при ультразвуковом алмазном выглаживании с касательно-осевым наложением УЗК.

**Список литературы:** 1. Шнейдер, Ю. Г. Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства. Л.: Машиностроение, 1972, 240с. 2. А. с. 1523316, МПК<sup>6</sup> В 24 В 39/00. Способ упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / Бондаренко В. М., Литвак В. П., Куликов В. Т., Балакин В. Ф. – № 3900501/23-27 ; заявл. 23.05.85 ; опубл. 23.11.89, Бюл. № 43. – 4 с. : ил. 3. Марков, А.И. Ультразвуковая обработка материалов. - М.: Машиностроение, 1980.– 237 с. 4. Бабичев, А. П. Отделочно-упрочняющая обработка деталей многоконтактным виброударным инструментом. / А. П. Бабичев, П. Д. Мотренко и др. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2003. – 192 с. 5. Смелянский, В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с. 6. Крагельский, И. В., Виноградова, И. Э. Коэффициенты трения. М.: Машиностроение. 1962, – 220 с. 7. Киселев Е.С. Новые методы ультразвуковой стабилизации остаточных напряжений в прецизионных шлифованных деталях технологических машин / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов, А.А. Норкин // Сб. трудов VII МНТК «Динамика технологических систем – 2004». – Саратов: СГТУ, 2004. – С. 192 – 195.

Сдано в редакцию 20.05.07

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ВАЛОВ ТОЧЕНИЕМ И АЛМАЗНЫМ ВЫГЛАЖИВАНИЕМ**

**Ковальногов В.Н.** (УлГТУ, г. Ульяновск, Россия)

*Results of research of efficiency of different schemes of combined machining of shafts by turning and a diamond burnishing with superposition of an ultrasonics are given. It is established, that radial turning of a wavecrest of the material displaced by burnisher, promotes decreasing of forces of a burnishing up to 2,3 times at simultaneous increase of depth of distribution of compressing residual stresses.*

Обязательными операциями в традиционных технологиях изготовления прецизионных валов являются шлифовальные, на которых обеспечивают заданную точность размеров и формы, а также шероховатость обработанных поверхностей. В последнее десятилетие появились публикации (см., например, [1, 2]), свидетельствующие о возможности в ряде случаев исключить операции шлифования, заменив их высокоскоростным точением, при обеспечении заданной точности обработки и шероховатости поверхности обработанных деталей. Развитию высокоскоростной обработки во многом способствовало создание новых теплостойких инструментальных материалов, а также технический прогресс в области оборудования, связанный с созданием высокоскоростных шпинделей, быстроходных приводов подачи, вибропоглощающих станин и др.

Однако в обоих случаях (и при шлифовании, и при высокоскоростном точении) поверхностный слой готовых деталей формируется в условиях интенсивного теплового воздействия, которое помимо нежелательных структурно-фазовых изменений приводит к разупрочнению поверхностного слоя и образованию в нем растягивающих остаточных напряжений. При этом силовое (упрочняющее) воздействие инструмента на