

УДК 612.431.75

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПОСЛЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО (УЗ) ВЫГЛАЖИВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТАЛЛОСОДЕРЖАЩЕЙ СМАЗКИ

В.А. Титов*, И.Г. Лавренко**, А.Д. Лавриненков*, А.Д. Коваль*

* Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина, 03056, г. Киев, пр-кт Победы, 37; E-mail: v.a.titov@list.ru

** Авиационный научно-технический комплекс «Антонов»,
Украина, 03062, г. Киев, ул. Туполева, 1

Приведены результаты исследования поверхностного пластического деформирования деталей из титановых сплавов BT22 и BT23 способом ультразвукового выглаживания с использованием металлосодержащих смазок. Установлено, что применение данных смазок расширяет технологические возможности процесса при управлении скоростью и усилием обработки, а также обеспечивает параметры качества поверхностного слоя.

Проведены конечно-элементное моделирование процесса выглаживания с целью получения остаточного напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя детали и сравнение его с экспериментальными данными.

поверхностное пластическое деформирование, ультразвуковое выглаживание, металлосодержащие смазки, титановые сплавы, конечно-элементное моделирование

ВВЕДЕНИЕ

При обработке деталей из титана и его сплавов в процессах поверхностного пластического деформирования (ППД) возникает ряд трудностей, связанных с высокой адгезией титана по отношению к обрабатываемому инструменту, в результате чего происходит разрушение поверхности и интенсифицируется износ инструмента.

Очевидным решением данной проблемы является разграничение поверхности детали и инструмента промежуточным материалом, как, например, использование предварительно нанесенной на деталь твердой смазки [1,2]. Удаление твердой смазки происходит за счет нагрева и ее выгорания, что приводит к изменению механических свойств материала детали и повышает стоимость технологического процесса.

Одним из способов, который позволяет уменьшить трение, является модификация смазочных материалов антифрикционными добавками, а также модификация смазок нано- и ультрадисперсными порошками мягких металлов (медь, олово, алюминий и т. д.). Дополнительное введение порошков металлов позволяет снизить коэффициент трения, увеличить удельное усилие обработки, величина которого обеспечивает увеличение глубины обработки и остаточных напряжений сжатия [3, 4].

Эффективным способом интенсификации процесса алмазного выглаживания материалов, в частности титана и его сплавов, является использование дополнительного нагружения рабочего инструмента ультразвуковыми колебаниями [5]. Тем не менее вследствие выделения большого количества энергии в месте контакта инструмента с деталью при обработке происходит схватывание титана с материалом выглаживателя, результатом чего становится повышенный износ инструмента и ухудшение поверхности обрабатываемой детали [6].

Цель работы – оценка влияния использования микропорошков пластичных металлов в смазке на состояние поверхности и приповерхностного слоя титанового образца при ультразвуковом (УЗ) выглаживании.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В данной работе в качестве основы металлосодержащей смазки было выбрано индустриальное масло И20, в качестве порошков – порошки меди-Си и алюминия-Аl со средним размером частиц 10 мкм. Объемное содержание порошка составляло 12, 25 и 32% от объема масла.

При содержании порошка 30-32% происходит изменение реологических свойств смазки. Оценка влияния объемного содержания порошка в смазке на ее реологические свойства была проведена на ротационном вискозиметре «Rheotest 2.1», который предназначен для измерения реологических свойств «неньютоновских жидкостей». Исследования смазок проводились при температуре 20⁰С и диапазоне градиентов скоростей течения 16-1320 с⁻¹.

Для проведения исследования влияния металлосодержащей смазки на параметры качества поверхности при УЗ выглаживании использовалась установка, изображенная на рис. 1, которая состоит из ультразвукового генератора 1, пьезоэлектрического полуволнового волновода ультразвуковых колебаний 3, выглаживателя 2, крепящегося на торце концентратора ультразвуковых колебаний, а также индикатора часового типа 4. Волновод в корпусе устанавливался на токарный станок. Для выглаживания использовались цилиндрические образцы из титанового сплава BT22 в отожженном состоянии. Диаметр образцов составлял 22 мм. В качестве инструмента был выбран твердый сплав ВК8 с рабочей поверхностью r = 3 мм. Частота УЗ колебаний – 21 кГц.

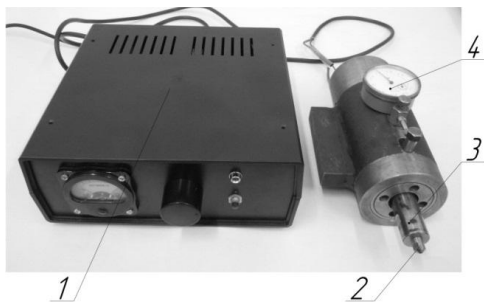


Рис. 1. Установка для УЗ выглаживания
Fig. 1. Plant for ultrasonic burnishing

Технологические режимы процесса обработки представлены в табл. 1. Перед выглаживанием образцы обрабатывались чистовым точением.

Замер шероховатости проводился с помощью профилометра цехового модели 296 ТУ-034-4-83 с автоматизированной системой измерения.

Фактура поверхности, микроструктура в исходном состоянии и после УЗ выглаживания, химический состав поверхности и приповерхностного слоя исследовались с помощью электронного РЕМ-106И и универсального MEIJI Techno серии RZ микроскопов.

Таблица 1 Режимы УЗ выглаживания
Table 1. Modes of ultrasonic burnishing

Показатели	Значения
Усилие P, Н	200
Подача s, мм/об	0,05
Линейная скорость образца V, м/мин	4.4; 10.4; 21.8

Замер микротвердости приповерхностного слоя образца до и после обработки УЗ выглаживанием проводился по стандартной методике с применением микротвердомера ПМТ-3. В качестве индентора использовалась четырехгранная пирамидка, масса груза составляла 100 г. Микротвердость замерялась по Виккерсу.

При конечно-элементном моделировании задача была упрощена до плоской постановки. Сферический индентор считался абсолютно жестким. Анализ выполнен в декартовой системе координат. Упруго-пластические свойства титанового сплава BT23 были получены в результате проведения механических испытаний. Коэффициент трения задавался $f=0,08$. Глубина внедрения индентора в поверхность детали задается по результатам эксперимента. Скорость обработки – $V=15$ м/мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлен график зависимости динамической вязкости μ смазки от градиента скорости течения $\dot{\gamma}$ при различном объемном содержании порошка меди соответственно.

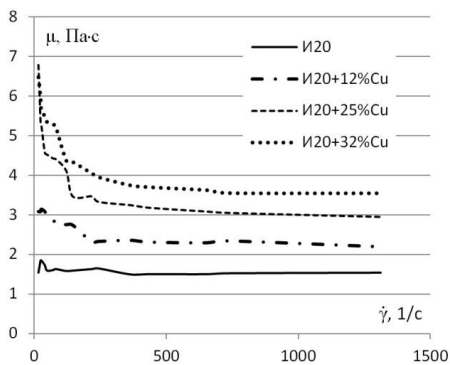


Рис. 2. Зависимость динамической вязкости μ масла И20 с различным объемным содержанием порошка меди от градиента скорости течения $\dot{\gamma}$.
Fig.2. The Dependence of dynamic viscosity μ of oil I20 with different volume content of copper powder on the velocity gradient flow

Из рис. 2 видно, что при увеличении объемного содержания порошка динамическая вязкость смазки увеличивается по сравнению с чистым маслом И20.

При градиентах скоростей $16-500$ с^{-1} вязкость смазок меняется нелинейно. Максимальное увеличение вязкости смазки с различным содержанием порошка по сравнению с чистым маслом И20 соответствует градиенту скорости $16-20$ с^{-1} и имеет следующие значения: при 12%-ном содержании порошка вязкость увеличивается в два раза по сравнению с вязкостью масла И20 – с 1,543 до 3,148 Па·с, при 25%-ном – в 4,3 раза (с 1,543 до 6,481 Па·с), а при 32%-ном – в 4,5 раза (с 1,543 до 6,790 Па·с).

При диапазонах градиентов скоростей $500-1312$ с^{-1} вязкость смазок изменяется незначительно. Динамическая вязкость смазок с 12%-ным содержанием порошка по сравнению с чистым маслом И20 увеличивается в 1,42 раза (с 1,543 до 2,3 Па·с), при 25%-ном – в 1,94 раза (с 1,543 до 3 Па·с) и при 32%-ном – в 2,26 раза (с 1,543 до 3,5 Па·с).

Увеличение динамической вязкости смазок, как это показано в работе [7], улучшает условия взаимодействия инструмента с поверхностью детали.

Как видно из рис. 2, условия взаимодействия будут зависеть от скорости обработки.

При проведении УЗ выглаживания использовались смазки на основе масла И20 с порошками алюминия и меди с объемным содержанием 32%.

Шероховатость поверхности после чистового точения составила $Ra=1,58$ мкм. Максимальное уменьшение шероховатости наблюдается при всех типах смазки на минимальных скоростях обработки поверхности $V = 4,4$ м/мин. На рис. 3 приведен график зависимости параметра шероховатости Ra от скорости обработки. На минимальных скоростях обработки при смазке И20 шероховатость поверхности минимальная $Ra=0,125$ мкм. При смазке как с порошком меди, так и с алюминием шероховатость мало отличается и составляет $Ra=0,15$ мкм. Увеличение шероховатости может объясняться увеличением вязкости смазки за счет добавления порошков. При дальнейшем увеличении скорости обработки характер изменения кривых параметра шероховатости Ra во всех трех случаях одинаков. До скорости 10,4 м/мин шероховатость увеличивается, а в диапазоне скоростей от 10,4 до 21,8 м/мин практически не меняется. При этих скоростях шероховатость поверхности, обработанной в присутствии смазки И20+Cu, больше шероховатости поверхности, обработанной с маслом И20 и смазкой И20+Al. Так, шероховатости поверхности, полученные при использовании масла И20 и смазки И20+Al при 21,8 м/мин, практически совпали и составили $Ra=0,17$ мкм, тогда как при смазке И20+Cu $Ra=0,22$ мкм.

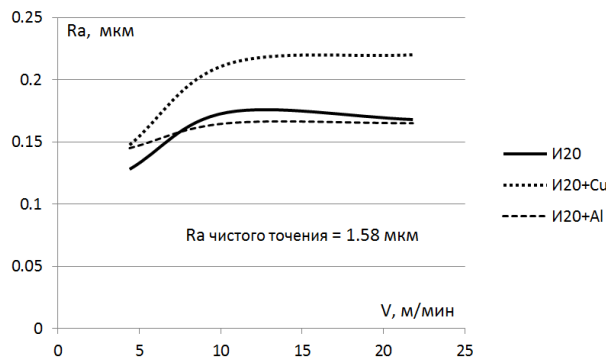


Рис. 3. Параметр шероховатости Ra при различных смазках в зависимости от скорости обработки V

Fig. 3. The roughness parameter Ra at various lubricants depending on the processing speed V

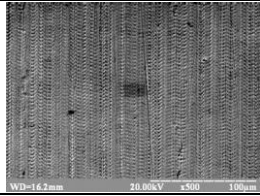
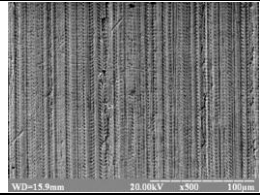
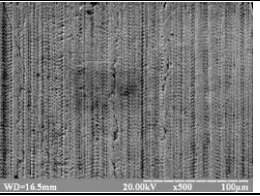
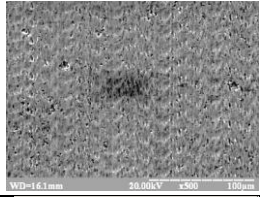
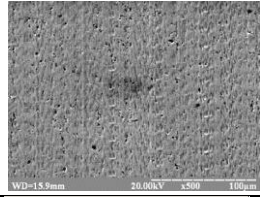
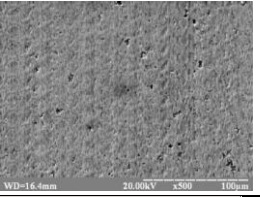
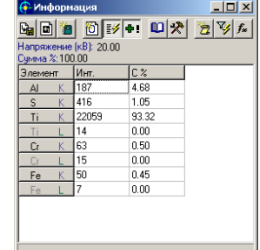
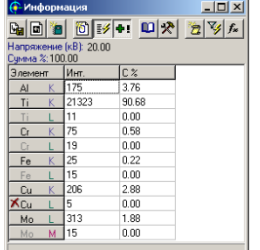
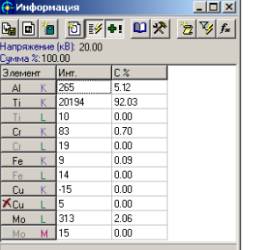
В табл. 3 представлены изображения фактуры поверхностей, выглаженных при скоростях обработки 4,4 и 21,8 м/мин при различных смазках, а также их химический состав при скорости обработки 21,8 м/мин.

При скорости обработки 4,4 м/мин с маслом И20 фактура поверхности имеет однородный характер, отсутствуют следы от чистового точения.

При смазке с порошками наблюдаются следы от чистового точения, причем на поверхности, обработанной в присутствии И20+Cu, эти следы видны более отчетливо, чем при обработке с И20+Al.

Поверхность, обработанная при скорости 21,8 м/мин со смазкой И20, имеет более грубую фактуру, следы от внедрения выглаживателя в поверхность образца видны более отчетливо в сравнении с обработкой со смазкой с порошками. При скоростях обработки 21,8 м/мин равномерная фактура поверхности с полным деформированием следов обработки от чистового точения и без видимых следов внедрения выглаживателя в поверхность соответствует обработке со смазкой И20+Al.

Таблица 3. Фактура поверхности и ее химический состав в зависимости от смазки
Table 3. The surface texture and the surface chemical composition depending on the lubricant

V, м/мин	И20	И20+Cu	И20+Al
4,4			
21,8			
Химический состав при 21,8 м/мин			

При химическом анализе поверхностей также было установлено, что доля Cu увеличивается с 0 до 2,88%, что свидетельствует о разграничении рабочей поверхности выглаживателя и поверхности образца слоем металлосодержащей смазки.

На рис. 4 показана микроструктура приповерхностного слоя металла образцов, выглаженных при различных смазках и скоростях обработки.

Исходная структура металла показана на рис. 4, а; зона перехода с участка чистового точения на участок УЗ выглаживания представлена на рис. 4, б.

При использовании оптического микроскопа установлено, что в переходной зоне внедрения выглаживателя наблюдается потемнение структуры на глубину 75-80 мкм. При исследовании данного участка с помощью электронного микроскопа обнаружено, что в зоне выглаживания происходит дробление исходной структуры металла (рис. 4, в).

На глубине до 2-6 мкм происходит максимальное дробление структуры металла. При УЗ выглаживании с маслом И20 максимальное дробление наблюдается при всех скоростях обработки, тогда как при смазках И20+Cu и И20+Al на скоростях обработки 4,4 м/мин максимального дробления структуры в поверхностном слое 1-10 мкм не наблюдается, что может объясняться повышенной вязкостью смазок (рис. 4, г).

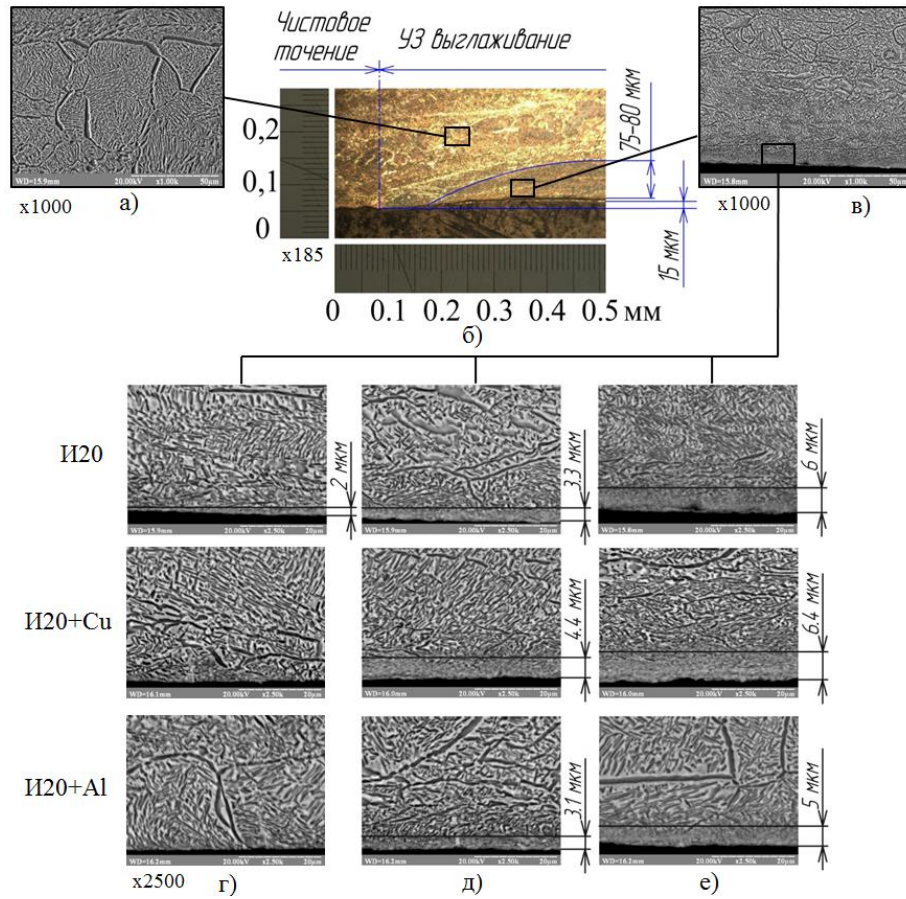


Рис. 4. Микроструктура приповерхностного слоя металла образцов:
 а – недеформированная (исходная) микроструктура; б – зона УЗ
 выглаживания; в – деформированная микроструктура (глубина 100 мкм);
 г, д, е – зоны дробления структуры при различных смазках и при скоростях
 обработки 4,4; 10,4 и 21,8 м/мин соответственно

Fig. 4. The microstructure of the surface layer of metal samples:
 а – undeformed (initial) microstructure; б – zone of ultrasonic burnishing;
 с – deformed microstructure (depth 100 m); д, е, ф – zones of shattering
 of structure at different lubricants and processing speeds 4,4; 10,4 and 21,8 m / min,
 respectively

При скоростях 10,4 и 21,8 м/мин глубина максимального дробления структуры при всех трех типах смазки составляет примерно одинаковую величину – 5-7 мкм (рис. 4, д, е).

Из рис. 5 видно, что глубина слоя деформационного упрочнения при обработке со всеми типами смазки составила 0,4-0,6 мм. Исходная микротвердость до УЗ выглаживания была 255-250 НВ. Максимальное увеличение микротвердости в 1,42-1,45 раза соответствует обработке со смазкой И20+Al. Увеличение микротвердости при обработке как с маслом И20, так и со смазкой И20+Cu происходит в 1,3-1,32 раза.

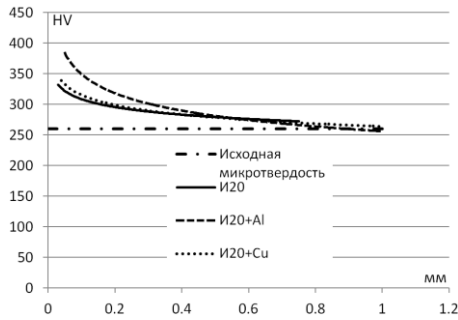


Рис. 5. Микротвердость поверхностного слоя при скорости обработки $V=4,4$ м/мин и различных типах смазки
 Fig. 5. The microhardness of the surface layer during the processing speed $V = 4,4$ m/min and the various types of lubricants

Следует отметить, что микротвердость у поверхности (0,03-0,10 мм) больше при обработке со смазкой И20+Cu, чем с маслом И20. Большая микротвердость поверхностных слоев при обработке со смазками И20+Al и И20+Cu по сравнению с маслом И20 может объясняться уменьшением разупрочняющего действия трения между инструментом и поверхностями образцов при наличии порошков мягких металлов в смазке.

Для конечно-элементного моделирования процесса выглаживания в программе Abaqus Student Edition 6.12 глубина внедрения индентора в поверхность детали задавалась по результатам исследования микроструктуры, представленным на рис. 4, б, где глубина внедрения составила 15-17 мкм.

Глубина залегания остаточных осевых (рис. 6) и тангенциальных (рис. 7) напряжений составила 0,60-0,65 мм, что хорошо согласуется с экспериментальными данными.

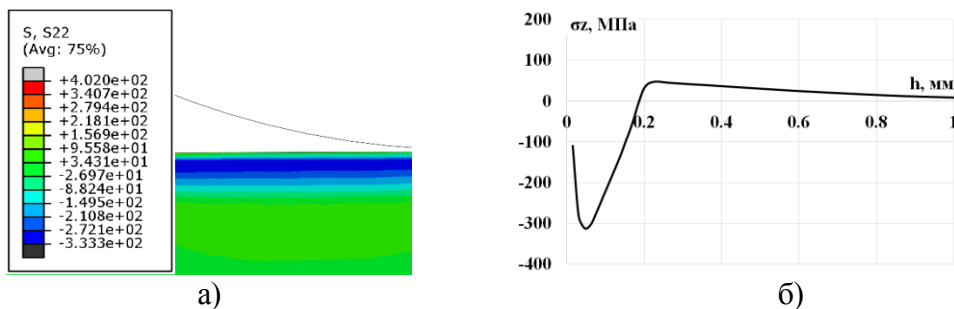


Рис. 6. Изолинии остаточных осевых напряжений (а) и распределение их по глубине (б)

Fig. 6. Isolines of residual axial stresses (a) their distribution in depth (b)

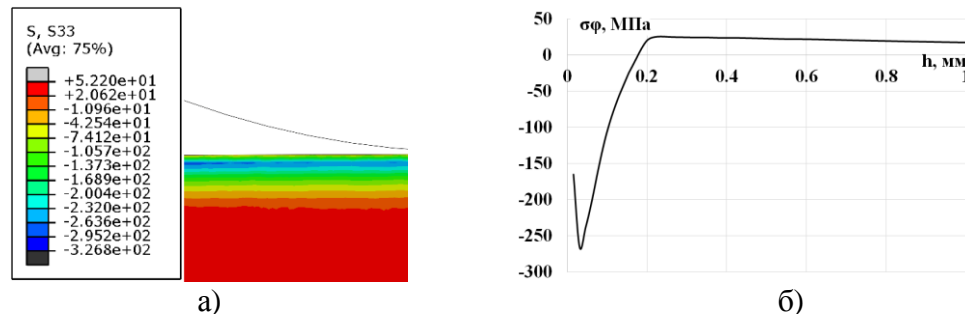


Рис. 7. Изолинии остаточных тангенциальных напряжения (а) и распределение их по глубине (б)

Fig. 7. Isolines of residual tangential stresses (a) their distribution in depth (b)

В целом как остаточные осевые, так и тангенциальные напряжения по глубине в приповерхностном слое до 200 мкм являются сжимающими.

Максимальная величина остаточных напряжений сжатия соответствует глубине 30-50 мкм и составляет 250-300 МПа. При увеличении глубины замера h величина остаточных напряжений сжатия уменьшается и на глубине 180-220 мкм переходит в растягивающие – уравнивающие остаточные напряжения величиной до 60-70 МПа.

В приповерхностном слое (менее 30...50 мкм) величина остаточных напряжений сжатия уменьшается также по величине. Это связано, по-видимому, с действием сдвиговых деформаций в металле заготовки, возникающих вследствие трения на контактной поверхности. Результатом этих деформаций сдвига является дробление структуры, что подтверждается экспериментальными данными.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально и численными методами расчета в программе Abaqus Student Edition 6.12 выполнена оценка параметров качества поверхности и приповерхностного слоя деталей из титанового сплава BT22 после УЗ выглаживания с применением металлосодержащей смазки на основе масла индустриального И20 с объемным содержанием порошка меди и алюминия до 32% в качестве наполнителя.

2. В результате исследования реологических свойств установлена зависимость динамической вязкости масла И20 с различным объемным содержанием наполнителя (порошка меди и алюминия) от градиента скорости течения. Показано, что в диапазоне скоростей обработки УЗ выглаживанием, который соответствует диапазону градиентов скоростей $500-1312 \text{ с}^{-1}$, вязкость смазки увеличивается пропорционально объемному содержанию наполнителя. Увеличение динамической вязкости смазок, как это показано в других работах авторов, улучшает условия взаимодействия инструмента с поверхностью детали.

3. Установлена зависимость параметра шероховатости R_a при УЗ выглаживании с металлосодержащими смазками в зависимости от скорости обработки. Показано, что при увеличении скорости обработки УЗ выглаживанием более 10 м/мин величина шероховатости зависит от вида смазки и не зависит от величины скорости обработки. При этом шероховатость поверхности $R_a=0,17-0,18$ мкм достигается при использовании смазок И20 и И20+Al, а шероховатость $R_a=0,22-0,23$ мкм при использовании И20+Cu. Анализ фактуры поверхности показал, что при использовании смазки И20+Al на деформированной поверхности отсутствуют следы предварительной обработки чистовым точением.

4. В результате химического анализа поверхности выглаженных образцов установлено, что содержание Cu увеличивается с 0 до 3% при использовании соответствующей смазки. Это свидетельствует о разграничении рабочей поверхности выглаживателя и поверхности образца пластичными элементами металлосодержащей смазки.

5. Металлографические исследования показали, что при скоростях обработки в диапазоне 10,4-21,8 м/мин глубина максимального дробления структуры при всех типах смазки составляет около 5-7 мкм. В результате измерения микротвердости показано также, что глубина деформационного упрочнения составляет 400-600 мкм, при этом максимальное увеличение микротвердости в 1,42-1,45 раз соответствует обработке со смазкой И20+Al.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Розенберг, О.А. К вопросу разработки технологических смазок для деформирующего протягивания деталей из сплава ВТ1-0 / О.А. Розенберг [и др.] // Технологические системы. – 2007. – №2(38). – С. 27-32.
2. Моляр, О.Г. Підвищення триботехнічних та втомних властивостей виробів з високоміцного титанового сплаву ВТ22 комбінованою поверхневою обробкою / О.Г. Моляр, В.А. Трофімов // Проблеми ресурсу та безпеки експлуатації конструкцій, споруд і машин: зб. наук. ст. ІЕЗ. – Київ, 2009. – С. 613-617.
3. Кужаров, А.А. Триботехнические свойства нанометрических кластеров меди: дис. ... канд. техн. наук / А.А. Кужаров. – Ростов-на-Дону, 2004.
4. KOTNAROWSKI Andrzej. Searching for Possibilities of Lubricating and Cutting Fluids Modification with Copper Micro- and Nanopowders // MATERIALS SCIENCE (MEDŽIAGOTYRA). – Vol. 12. – No. 3. – 2006. – Pp. 202-208.
5. Лесюк, Е.А. Влияние режима ультразвуковой упрочняющей обработки на качество обрабатываемой поверхности / Е.А. Лесюк, В.П. Алехин, Ким Чанг Сик // Вестник машиностроения. – 2008. – №9. – С. 52-55.
6. Титов, В.А. Особенности алмазного выглаживания сплава ВТ-22 с дополнительным ультразвуковым воздействием на инструмент / В.А. Титов [и др.] // Обработка материалов давлением. – 2009. – №1(20). – С. 166-172.
7. Титов, А.В. Повышение эффективности выглаживания различных конструкционных материалов за счет управления скоростными и силовыми параметрами нагружения инструмента // Вестник национального технического университета Украины «КПИ». Сер. машиностроение. – 2010. – №59. – С. 121-125.

PARAMETERS ESTIMATION OF A PARTS SURFACE QUALITY POST ULTRASOUND BURNISHING WITH USE OF METAL-CONTAINING LUBRICANTS

V.A. Titov*, I.G. Lavrenko**, A.D. Lavrinenkov*, A.D. Koval*

*National Technical University of Ukraine «Kiev Politechnical Institute»,
Ukraine, 03056, Kiev, Peremogy prospect, 37; E-mail: v.a.titov@list.ru

**Avia Science-Technical Complex «Antonov», Ukraine, 03062, Kiev, Tupolev St., 1

The research results of surface plastic deformation of parts made of titanium alloys VT22 and VT23 by ultrasound burnishing with the use of metal-containing lubricants are presented. It was found that the application of these lubricants extends the technological process capability in managing the processing speed and force, and also provides parameters of surface layer.

The finite element simulation of the process of burnishing was carried out in order to obtain the residual stress-strain state of the surface layer of parts and to compare theirs with experimental data.

surface plastic deformation, ultrasonic burnishing, metal-containing lubrication, titanium alloys, finite-element simulation