

*In this paper, based on the finite element method executed simulation on computer of the squeezing operation with thinning of thick-walled tube workpieces on based software QFORM 2D – 3D. Bring the results of theoretical researches of modes of force of squeezing operation with thinning of thick-walled tube workpieces. Show the effect of technological parameters on modes of force of the squeezing operation with thinning of thick-walled tube workpieces.*

*Key words:* *Simulation, the squeezing with thinning, Bottom Die, Top Die, force, the coefficient of squeezing, the coefficient of thinning.*

*Mitin Oleg Nikolaevich, candidate of technical sciences, doctoral, [mpf-tula@rambler.ru](mailto:mpf-tula@rambler.ru), Russia, Tula, OPC "SPA "SPLAV",*

*Nuzhdin Georgiy Anatolievich, [mpf-tula@rambler.ru](mailto:mpf-tula@rambler.ru), Russia, Moscow, organ by quality system certification "Konsersium".*

*Nguyen Quoc Huy, postgraduate, [mpf-tula@rambler.ru](mailto:mpf-tula@rambler.ru), Russia, Tula, Tula State University*

УДК 612.431.75

## **ОСОБЕННОСТИ ВЫГЛАЖИВАНИЯ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТАЛЛОСОДЕРЖАЩИХ СМАЗОК**

В.А. Титов, И.Г. Лавренко, А.Д. Лавриненков, И.Г. Савчинский

*Рассмотрено применение смазок на основе масла И20 с добавлением порошков пластичных металлов в процессах выглаживания титановых сплавов BT22 и BT23 с дополнительным ультразвуковым нагружением на инструмент. Установлено, что применение данных смазок расширяет технологические режимы обработки титановых сплавов, за счет снижение адгезионной составляющей трения.*

*Ключевые слова:* *поверхностно-пластическая обработка, титановые сплавы, ультразвуковое выглаживание, металлосодержащие смазки, конечно-элементное моделирование.*

В машиностроении титан и сплавы на его основе нашли широкое применение ввиду таких свойств как малая плотность, высокая прочность, вибропрочность, коррозионная стойкость и другие. Однако, из-за малой теплопроводности и высоких адгезионных свойств механическая обработка титана в ряде случаев является затруднительной, а в процессах характеризующимися повышенными силами трения, как например при алмазном выглаживании, зачастую невозможна без предварительной обработки детали. При алмазном выглаживании титановых сплавов между поверхностью инструмента и поверхностью детали формируются участки схватывания, результатом чего является разрушение поверхности детали и интенсификация износа инструмента.

Перспективным направлением интенсификации процессов поверх-

ностно-пластического деформирования, в том числе процесса выглаживания, деталей из титановых сплавов является модификация смазочных материалов антифрикционными добавками, а также модификация смазокnano- и ультрадисперсными порошками пластичных 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 [1, 2]. Положительный эффект от использования данных смазок проявляется при длительной эксплуатации (в узлах трения зубчатых передачах, двигателях внутреннего сгорания), так как процентное содержание металлического порошка в масле не превышает 1-3%.

Применение в качестве разграничающей среды твердых смазок [3] дает положительный результат при выглаживании титановых сплавов. Отмечается, что в приповерхностном слое детали происходит дробление зерен и вытягивание их в направлении движения инструмента без разрушения поверхностного слоя. Удаление твердой смазки производят путем нагрева и ее выгорания, что приводит к изменению механических свойств материала детали. Это в ряде случаев является недопустимым, а также увеличивает стоимость технологического процесса.

Одним из способов интенсификации процесса выглаживания является наложение ультразвука на инструмент, результатом чего является более высокие параметры качества поверхности и поверхностного слоя [4-6]. Тем не менее, при больших скоростях обработки выглаживанием вследствие выделения большого количества энергии в месте контакта инструмента с деталью происходит схватывание титана с материалом выглаживателя. Результатом этого является повышенный износ инструмента и ухудшение поверхности обрабатываемой детали [7-9].

Целью работы является оценка влияния использования микропорошков пластичных металлов в смазке на состояние поверхности и приповерхностного слоя титановых образцов при ультразвуковом (УЗ) выглаживании.

**Методика эксперимента.** Металлосодержащая смазка была изготовлена на основе индустриального масла И20. В качестве наполнителя использовались порошки меди - Cu и алюминия - Al со средним размером частиц 10 мкм. Объемное содержание порошка составляло до 32% от объема масла.

При содержании порошка 30-32% происходит изменение реологических свойств смазки. Оценка влияния объёмного 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 20<sup>0</sup>С и диапазоне градиентов скоростей течения 16-1320 с<sup>-1</sup>.

Исследование влияния металлоконтактной смазки на параметры качества поверхности при УЗ выглаживании проведено на установке для УЗ выглаживания (рис. 1), которая состоит из ультразвукового генератора 1, выглаживателя 2, который крепится торце пьезоэлектрического полуволнового волновода ультразвуковых колебаний 3. Усилие выглаживания создается пружиной сжатия, деформация которой контролируется индикатором часового типа 4. Волновод в корпусе устанавливался на токарный станок.



**Рис. 1. Установка для УЗ выглаживания**

Для выглаживания использовались цилиндрические образцы из титанового сплава ВТ22 в отожжённом состоянии. Диаметр образцов составлял 22 мм. В качестве материала выглаживателя был выбран твердый сплав ВК8 с рабочей поверхностью радиусом 3 мм. Частота УЗ колебаний составляла 21 кГц, амплитуда колебаний - 30 мкм.

Технологические режимы процесса выглаживания 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 микроскопа РЕМ-106И.

**Таблица 1**  
**Режимы УЗ выглаживания**

Усилие – Р, Н	200
Подача - s, мм/об	0,05
Линейная скорость обработки - 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.

Конечно-элементное моделирования проводилось в программном комплексе Abaqus в объемной постановке, выглаживатель 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 равным 0,08.

**Результаты и их обсуждение.** В результате реологических испытаний было установлено, что при увеличении объемного содержания порошка динамическая вязкость смазки увеличивается по сравнению с чистым маслом И20. Максимальное увеличение вязкости смазки в 4,5 раза (с 1,543 Па·с до 6,790 Па·с) соответствует градиенту скорости 16-20 с<sup>-1</sup>.

При градиентах скоростей в диапазоне 500 - 1312 с<sup>-1</sup> вязкость смазок изменяется незначительно. По сравнению с чистым маслом И20 динамическая вязкость увеличивается в 2,3 раза (с 1,543 Па·с до 3,5 Па·с).

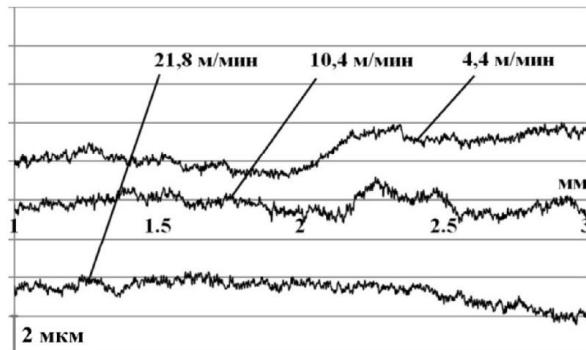
Увеличение динамической вязкости смазок, как это показано в работе [10], улучшает условия взаимодействия инструмента с поверхностью детали.

Анализ профилограмм поверхностей (рис. 2-4) после УЗ выглаживания с различными смазками показал уменьшение высоты неровностей поверхности в 5-6 раз по сравнению с чистовым точением. Наилучшая картина наблюдается при УЗ выглаживании с маслом И20. При смазке И20+Cu и скорости выглаживания  $V=10,4$  м/мин наблюдается чередующиеся пики, что свидетельствует о наличии остаточных следов от резца после чистового точения. Со смазкой И20+Al остаточных пиков не наблюдается.

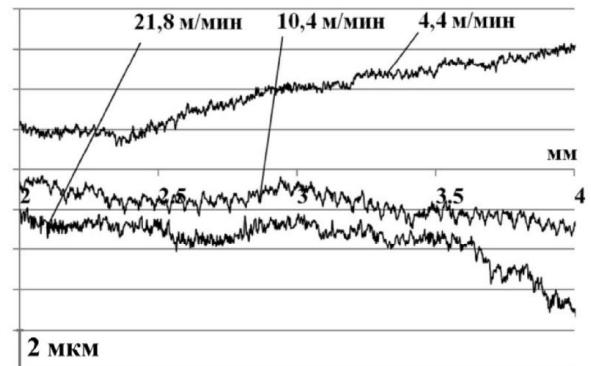
Шероховатость поверхности после чистового точения составила  $R_a=1,58$  мкм. Максимальное уменьшение шероховатости наблюдается при всех типах смазки на минимальной скорости обработки  $V = 4,4$  м/мин (рис. 5). На этой скорости обработки при смазке И20 шероховатость поверхности составила  $R_a=0,125$  мкм.

При смазке, как с порошком мсди, так и с алюминием шероховатость мало отличается и составляет  $R_a=0,15$  мкм. Увеличение шероховатости может объясняться увеличением вязкости смазки за счет добавления порошков. При дальнейшем увеличении скорости обработки характер изменения кривых параметра шероховатости  $R_a$  во всех трех случаях одинаков. До скорости 10,4 м/мин шероховатость увеличивается, а в диапазоне скоростей от 10,4 м/мин до 21,8 м/мин практически не меняется. При этих скоростях шероховатость поверхности обработанной с использованием смазки И20+Cu больше шероховатости поверхности обработанных с маслом И20 и смазкой И20+Al. Так шероховатость поверхности полученной при использовании масла И20 и смазки И20+Al при скорости 21,8 м/мин

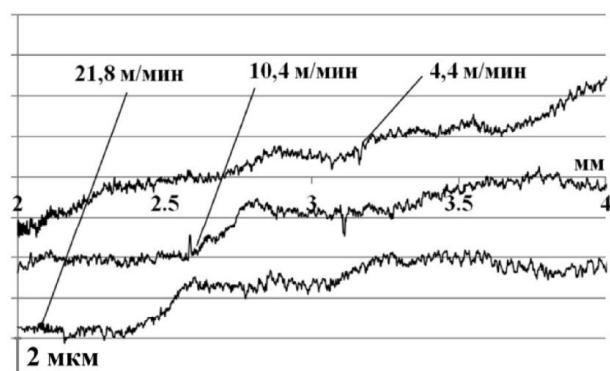
практически совпали и составили  $R_a=0,17$  мкм, тогда как при смазке И20+Cu -  $R_a=0,22$  мкм.



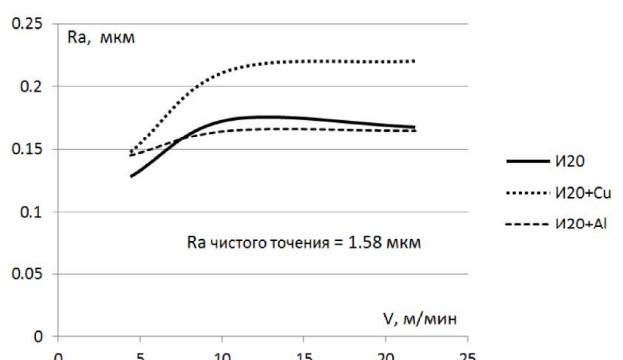
*Рис. 2. Профилограммы поверхности в зависимости от скорости обработки с маслом И20*



*Рис. 3. Профилограммы поверхности в зависимости от скорости обработки со смазкой И20+Сu*

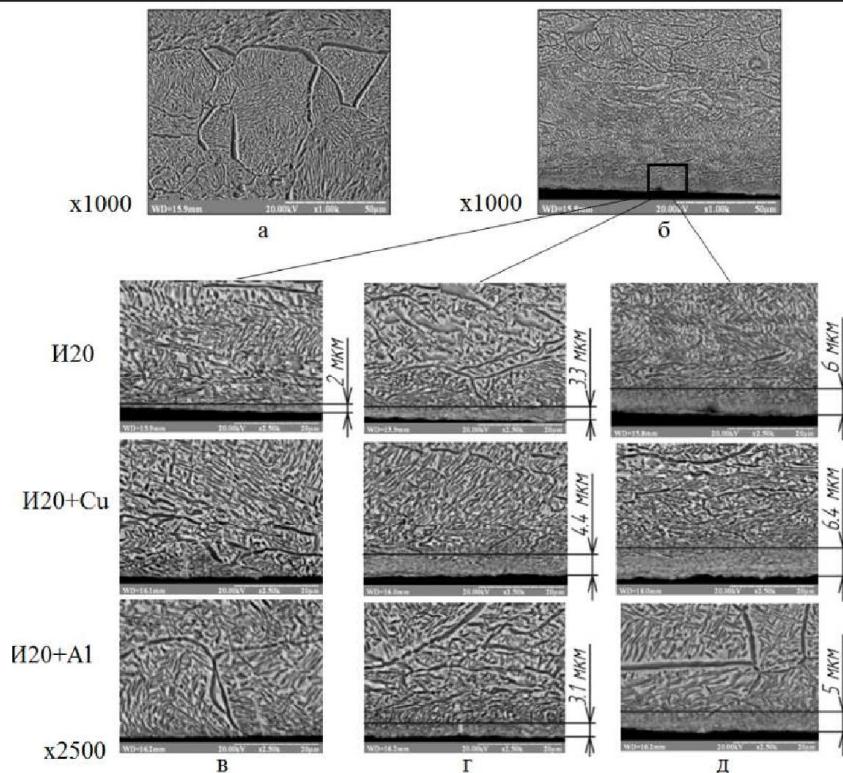


*Рис. 4. Профилограммы поверхности в зависимости от скорости обработки со смазкой И20+Al*



*Рис. 5. Параметр шероховатости поверхности  $R_a$  при различных смазках в зависимости от скорости обработки  $V$*

Интенсивное дробление зерен структуры металла поверхностного слоя (рис. 6, а) наблюдается на глубине до 100 мкм (рис. 6, б). На глубине до 2-6 мкм происходит интенсивное дробление структуры металла, зависящее от скорости обработки. Так, при УЗ выглаживании с маслом И20 максимальное дробление наблюдается при всех скоростях обработки, тогда как при смазках И20+Сu 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. 6, в).



**Рис. 6. Микроструктура поверхностного слоя металла образцов:**  
**а – исходная структура; б – структура после УЗ выглаживания;**  
**в, г, д – поверхностный слой после обработки с различными смазками**  
**и при скоростях обработки 4,4 м/мин, 10,4 м/мин и 21,8 м/мин**  
**соответственно**

При скоростях 10,4 м/мин и 21,8 м/мин глубина максимального дробления структуры при всех 3 типах смазки составляет 5-7 мкм (рис. 6, г, д).

В табл. 3 показана фактура поверхности образцов выглаженных при скоростях обработки 4,4 м/мин и 21,8 м/мин при различных смазках, а также их химический состав при скорости обработки 21,8 м/мин.

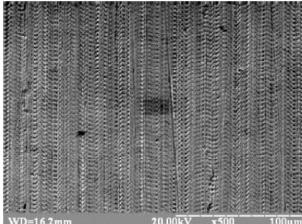
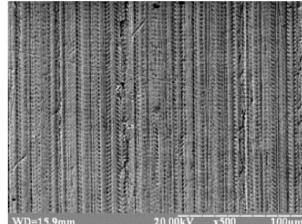
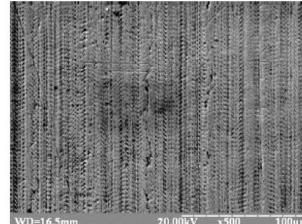
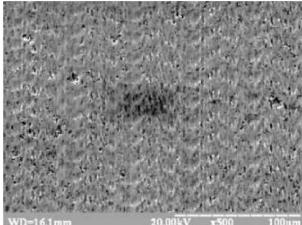
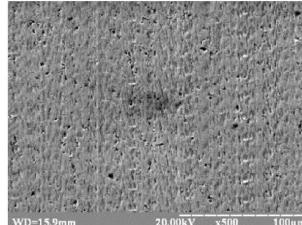
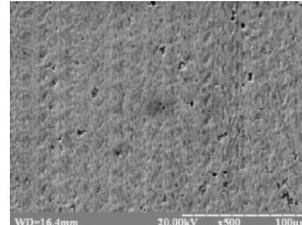
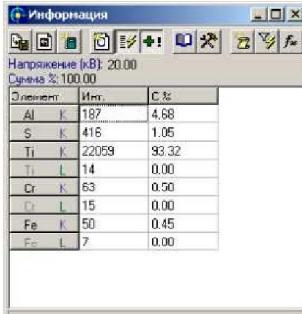
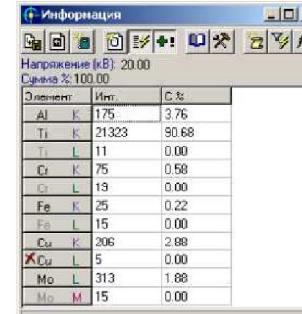
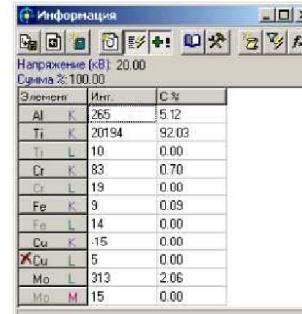
При скорости обработки 4,4 м/мин с маслом И20 фактура поверхности имеет однородный характер, отсутствуют следы от чистового точения.

При смазке с порошками наблюдаются следы от чистового точения, причем на поверхности, обработанной с использованием смазки И20+Сu эти следы видны более отчетливо, чем при обработке со смазкой 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.

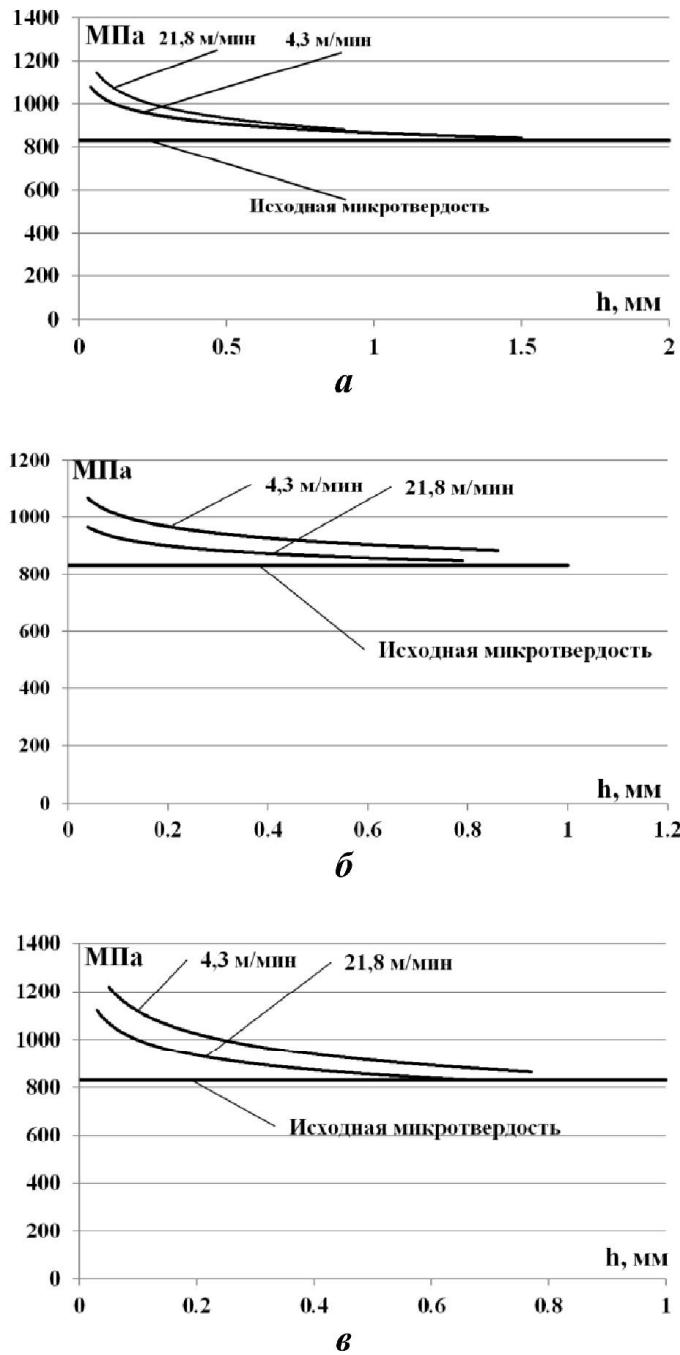
*Фактура поверхности и ее химический состав в зависимости от смазки*

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

Глубина слоя деформационного упрочнения при обработке со всеми типами смазки составила 0,4-0,6 мм (рис. 7). Исходная микротвердость до УЗ выглаживания составляет 820-830 МПа. Максимальное увеличение микротвердости в 1,42-1,45 раза соответствует обработке со смазкой И20+Al (рис. 7, в). Увеличение микротвердости при обработки как с маслом И20, так и со смазкой И20+Cu происходит в 1,3-1,32 раза (рис. 7, б).

Следует отметить, что при минимальной скорости обработки  $V=4,4$  м/мин микротвердость у поверхности (0,03-0,1 мм) больше при обработке со смазками И20+Cu и И20+Al, чем с маслом И20. Большая микротвердость поверхностных слоев при обработке со смазках И20+Al и И20+Cu в сравнении с маслом И20 может объясняться уменьшением разу-

прочняющего действия трения между инструментом и поверхностями образцов при наличии порошков пластичных металлов в смазке.

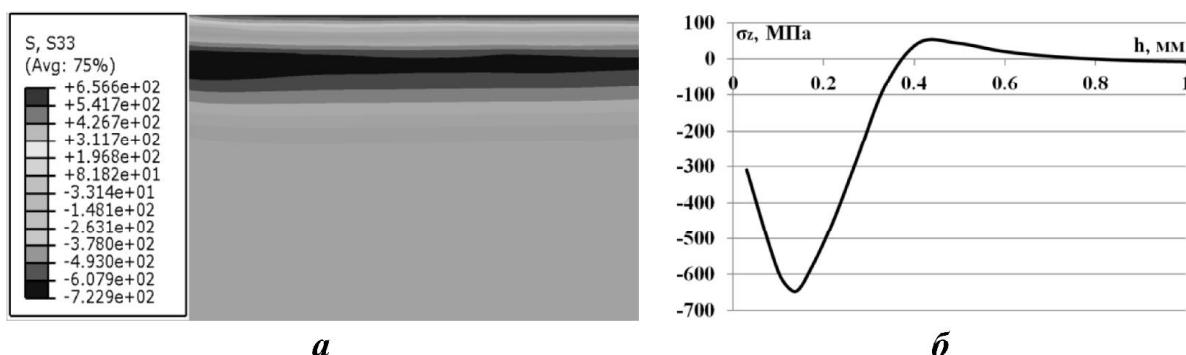


**Рис. 7. Микротвердость приповерхностного слоя сплава BT22 в зависимости от частоты вращения образца при смазке I20 (а), I20+Cu (б) и I20+Al (в)**

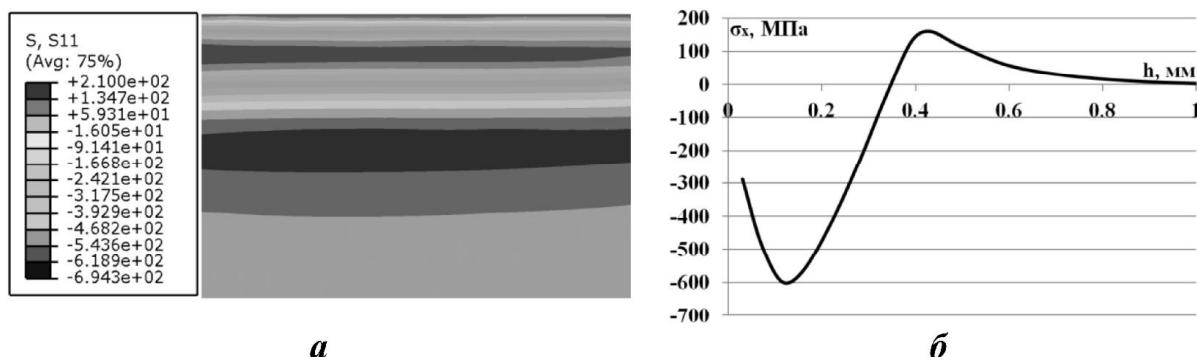
При обработке на максимальной скорости  $V=21,8$  м/мин с маслом И20 происходит увеличение микротвердости как вблизи поверхности так и по глубине. При обработке с металлосодержащими смазками с увеличени-

ем скорости обработки значения микротвердости уменьшаются как вблизи поверхности так и по глубине.

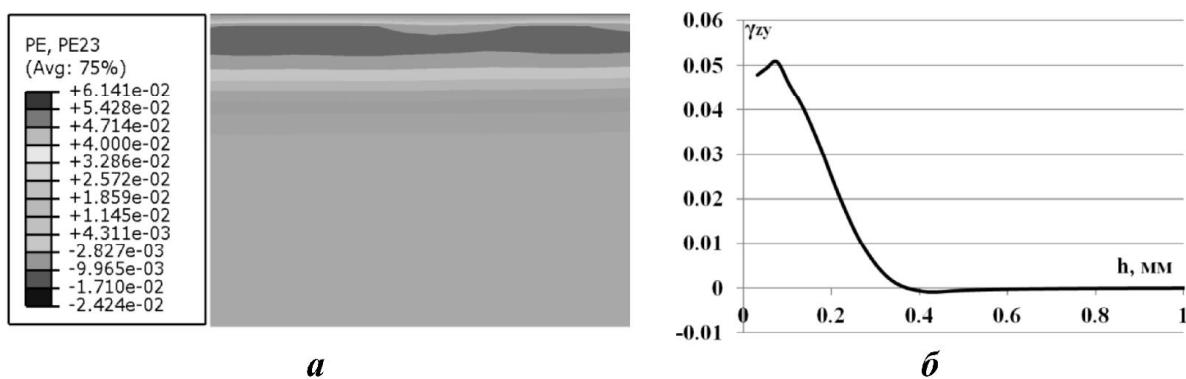
При конечно-элементном моделировании процесса выглаживания глубина внедрения индентора в поверхность детали задавалась равной 15-17 мкм по результатам исследования микроструктуры. Глубина залегания остаточных осевых (рис. 8) и тангенциальных (рис. 9) напряжений составила 0,60-0,65 мм, что хорошо согласуется с экспериментальными данными. На глубине 350-400 мкм напряжения являются сжимающими.



**Рис. 8. Изолинии остаточных осевых напряжений (а) и распределение их по глубине (б)**



**Рис. 9. Изолинии остаточных тангенциальных напряжения (а) и распределение их по глубине (б)**



**Рис. 10. Изолинии остаточных сдвиговых деформаций  $\gamma_{xy}$  (а) и распределение их по глубине (б)**

Максимальная величина остаточных напряжений сжатия соответствует глубине 150-180 мкм и составляет 600-620 МПа. При увеличении глубины замера величина остаточных напряжений сжатия уменьшается и на глубине 350-400 мкм переходит в растягивающие – уравновешивающие остаточные напряжения величиной до 30-180 МПа.

Уменьшение величины нормальных остаточных напряжений в приповерхностном слое глубиной до 150-180 мкм связано с действием сдвиговых деформаций в металле заготовки, возникающих вследствие трения на контактной поверхности. Величина сдвиговых остаточных напряжений показана на рис. 10.

Результатом деформаций сдвига является дробление исходных зерен структуры в приповерхностном слое, что подтверждается экспериментальными данными.

**Выводы:**

1. Проведено исследование влияние металлоксодержащих смазок на параметры качества поверхности и поверхностного слоя цилиндрических образцов из титанового сплава ВТ23 и ВТ22 при процессе УЗ выглаживания.

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 с<sup>-1</sup>, 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. Установлено, что при увеличении скорости обработки УЗ выглаживанием более 10 м/мин, величина шероховатости зависит от вида смазки и не зависит от величины скорости обработки. Анализ фактуры поверхности показал, что при использовании смазки И20+Аl на деформированной поверхности отсутствуют следы предварительной обработки чистовым токением.

4. В результате химического анализа поверхности выглаженных образцов установлено, что содержание Си увеличивается с 0% до 3% при использовании соответствующей смазки. Это свидетельствует о разграничении рабочей поверхности выглаживателя и поверхности образца пластичными элементами металлоксодержащей 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 соответствует обработке со смазкой И20+Аl в 1,42-1,45 раз.

### **Список литературы**

1. Кужаров А. А. Триботехнические свойства нанометрических кластеров меди: дис. канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 2004. С. 110-116.
2. A. Kotnarowski. Searching for Possibilities of Lubricating and Cutting Fluids Modification with Copper Micro and Nanopowders // Material science. Vol. 12. No. 3. 2006. P.P. 202-208.
3. Розенберг О. А., Пащенко Е. А., Шейкин С. Е., Ростоцкий И. Ю. К вопросу разработки технологических смазок для деформирующего протягивания деталей из сплава ВТ1-0 // Технологические системы. 2007. №2(38). С. 27-32.
4. Лесюк Е. А., Алехин В. П., Ким Чанг Сик. Влияние режима ультразвуковой упрочняющей обработки на качество обрабатываемой поверхности // Вестник машиностроения. 2008. №9. С. 52-55.
5. Боровин Ю. М. Повышение геометрических и физико-механических характеристик поверхностного слоя при финишной ультразвуковой обработке: дис. канд. техн. наук. М., 2005. С. 86-95.
6. Киселев Е. С. Интенсификация процессов механической обработки использованием энергии ультразвукового поля: Учебное пособие. – Ульяновск: УлГТУ, 2003. – 186 с.
7. Белецкий В. М., Полоцкий И. Г., Прокопенко Г. И., Табачник В. И. Поверхностное упрочнение титанового сплава ВТ22 с помощью ультразвука // Вестн. машиностроения. 1977.– № 4. – С. 74–75
8. Степчева З. В. Повышение эффективности алмазного выглаживания на основе рационального использования энергии модулированного ультразвукового поля: дис. канд. техн. наук. Ульяновск, 2007. С. 121-123.
9. Титов В. А., Никитенко В. А., Титов А. В., Пливак А. А., Лавриненков А. Д. Особенности алмазного выглаживания сплава ВТ-22 с дополнительным ультразвуковым воздействием на инструмент // Обработка материалов давлением. 2009. №1(20). С. 166-172.
10. Титов А. В. Повышение эффективности выглаживания различных конструкционных материалов за счет управления скоростными и силовыми параметрами нагружения инструмента // Вестник национального технического университета Украины “КПИ”. Серия машиностроение. - 2010. №59. С. 121-125.

*Титов Вячеслав Андреевич, д-р техн. наук, проф., зав. каф., [v.a.titov@list.ru](mailto:v.a.titov@list.ru),  
Украина, Киев, НТУУ «Киевский политехнический институт»,*

---

*Лавренко Иван Григорьевич, главный металлург, [alavrinenkov@hotmail.com](mailto:alavrinenkov@hotmail.com),  
Украина, Киев, АНТК «Антонов»,*

*Лавриненков Антон Дмитриевич, асс., [alavrinenkov@hotmail.com](mailto:alavrinenkov@hotmail.com), Украина,  
Киев, НТУУ «Киевский политехнический институт»,*

*Савчинский Иван Григорьевич, канд. техн. наук, [alavrinenkov@hotmail.com](mailto:alavrinenkov@hotmail.com),  
Москва, Россия, Московский государственный машиностроительный университет  
(МАМИ)*

**FEATURES OF BURNISHING PROCESS OF TITANIUM ALLOYS WITH USAGE  
OF METAL CONTAINING LUBRICANTS**

*V.A. Titov, I.G. Lavrenko, A.D. Lavrinencov, I.G. Savchinskiy*

*The application of oil-based lubricants I20 powders with the addition of soft metals in the process of smoothing titanium alloys VT22 and VT23 with additional ultrasonic loading at the instrument. It was found that the application of these lubricants expands technological modes of processing of titanium alloys due to decrease of adhesion component of friction.*

*Keywords: surface-plastic treatment, titanium alloys, ultrasonic burnishing, metal-containing lubricant, finite element simulation.*

*Titov Vyacheslav Andreevich, doctor of technical sciences, professor, manager of department, [v.a.titov@list.ru](mailto:v.a.titov@list.ru), Ukraine, Kiev, NTUU "Kiev Polytechnic Institute",*

*Lavrenko Ivan Grigorievich, main metallurgist, [alavrinenkov@hotmail.com](mailto:alavrinenkov@hotmail.com),  
Ukraine, Kiev, Antonov Company,*

*Lavrinencov Anton Dmitrievich, assistant, [alavrinenkov@hotmail.com](mailto:alavrinenkov@hotmail.com), Ukraine,  
Kiev, NTUU "Kiev Polytechnic Institute",*

*Savchinskiy Ivan Grigorievich, candidate of technical sciences, [alavrinenkov@hotmail.com](mailto:alavrinenkov@hotmail.com), Moscow, Russia, Moscow state university of mechanical engineering (MAMI).*