

УДК 612.431.75

В. А. ТИТОВ¹, А. Д. ЛАВРИНЕНКОВ¹, О. В. ГЕРАСИМОВА²

¹Национальный технический университет Украины «КПИ», Украина

²Национальный авиационный университет, Украина

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ МЕТАЛЛОСОДЕРЖАЩЕЙ СМАЗКИ НА КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИНСТРУМЕНТА С ПОВЕРХНОСТЬЮ ДЕТАЛИ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ВЫГЛАЖИВАНИИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Выполнено исследование параметров качества поверхностного слоя (шероховатости поверхности, микроструктуры, химического состава) после ультразвукового выглаживания титанового сплава VT22 с использованием металло-содержащей смазки. Исследованы реологические свойства смазки на основе масла И20 с добавками микропорошков меди и алюминия. Установлено, что при обработке между инструментом и поверхностью детали формируется промежуточный слой металло-содержащей смазки, что подтверждается увеличением доли пластичного металлического наполнителя в химическом составе поверхности детали. Рассмотрена модель контактного взаимодействия инструмента с поверхностью детали при выглаживании с металло-содержащей смазкой, которая учитывает наличие пластичного промежуточного слоя.

Ключевые слова: ультразвуковое выглаживание, металло-содержащая смазка, титановые сплавы, модель контактного взаимодействия.

Введение. Повышение надежности и ресурса изделий является важнейшей задачей современного машиностроения. Эти эксплуатационные характеристики определяют в целом эффективность таких изделий машиностроения, как летательные аппараты, авиационные двигатели, автомобили и другие. Работоспособность и надежность машины в значительной степени зависят от качества поверхности деталей, поскольку, отказ изделий происходит, как правило, вследствие повреждений усталостного характера. Учитывая то, что зарождение усталостной трещины начинается с поверхности заготовки или в приповерхностном слое [1, 2], на финишных операциях изготовления ответственных деталей изделий производят отделочно-упрочняющую обработку методами поверхностного пластического деформирования (ППД). Эта обработка позволяет улучшить параметры качества поверхностного слоя деталей, уменьшить вероятность появления усталостной трещины при эксплуатации деталей, повысив тем самым надежность и ресурс изделий в целом. Одним из наиболее эффективных методов ППД является выглаживание.

Обеспечение эффективности эксплуатации конструкций также связано с применением материалов с низкой плотностью, высокой удельной прочностью и жесткостью, таких как титановые сплавы. Однако при использовании выглаживания для обработки титановых сплавов возникает ряд трудностей, связанных с их высокими адгезионными свойствами, малой теплопроводностью, склонностью их к холодному свариванию с инструментом [3, 4]. Поэтому решение научно-прикладной задачи выглаживания титановых сплавов является актуальной для современного машиностроения.

Анализ литературных источников. Обеспечение эффективности процесса выглаживания может быть достигнуто путем снижения коэффициента трения

между инструментом и деталью. Это может быть достигнуто при создании условий контактного взаимодействия, соответствующему гидродинамическому трению. Согласно теории гидродинамического трения [6, 7], основными влияющими параметрами процесса взаимодействия являются – вязкость смазки и скорость взаимного движения трущихся тел (инструмента и детали).

Экспериментально показано, что увеличение коэффициента вязкости смазок вплоть до использования твердых смазок дает положительный результат [3-5]. В качестве твердых смазок могут быть использованы металлические, неметаллические и комбинированные покрытия, в том числе ионно-вакуумные многослойные покрытия. Однако необходимость последующего удаления таких твердых покрытий, например, путем нагрева детали приводит к изменению физико-механических свойств сплава, что в ряде случаев является недопустимым, а также делает технологический процесс изготовления более дорогостоящим.

Перспективным направлением интенсификации процессов ППД, в том числе процесса выглаживания, деталей из титановых сплавов является модификация смазочных материалов антифрикционными добавками, в том числе 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 [8-11]. В большинстве работ влияние добавления ультрадисперсных порошков в смазочные материалы исследовалось на моторных маслах для пар трения. В работах [8, 9, 11] исследованы процессы длительного контакта деталей двигателя, поэтому объемное содержание металлического порошка колеблется в пределах 0,5-3,0 %. При таком содержании порошка реологические свойства смазки изменяются не значительно. В процессах ППД удельные усилия контактного взаимодействия инструмента с поверхностью детали имеют значительную величину, поэтому вопрос увеличения объемного содержания металлопорошков в смазке является актуальным.

Эффективным способом интенсификации процесса алмазного выглаживания труднообрабатываемых материалов, в частности титана и его сплавов, является дополнительное нагружение рабочего инструмента ультразвуковыми колебаниями [12-15]. Однако в виду высокой адгезии титана и его сплавов по отношению к обрабатываемому инструменту при обработке на высоких скоростях происходит схватывание титана с материалом выглаживателя, результатом чего является повышенный износ инструмента и ухудшение поверхности обрабатываемой детали [16].

Целью работы является оценка влияния использования микропорошков мягких металлов в смазке на состояние поверхности и приповерхностного слоя титанового образца при ультразвуковом (УЗ) выглаживании на основе модели контактного взаимодействия инструмента и детали.

Методы исследования. В данной работе в качестве основы металлосодержащей смазки было выбрано индустриальное масло И20. В качестве порошков были выбраны порошки меди-Cu и алюминия-Al со средним размером частиц 10 мкм. Объемное содержание порошка составляло 12, 25 и 32 %.

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 20 °С и диапазоне градиентов скоростей течения 16-1320 с⁻¹.

Для проведения исследования влияния металлосодержащей смазки на параметры качества поверхности при УЗ выглаживании использовалась установка для УЗ выглаживания (рис. 1), которая состоит из ультразвукового генератора 1, пьезоэлектрического полуволнового волновода ультразвуковых колебаний 3, выглаживателя 2, который крепится 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 отожжённом состоянии. Диаметр образцов составлял 22 мм. В качестве инструмента был выбран твердый сплав ВК8 с рабочей поверхностью радиусом $r = 3$ мм. Частота и амплитуда УЗ колебаний составляли 21 кГц и 86 мкм соответственно.

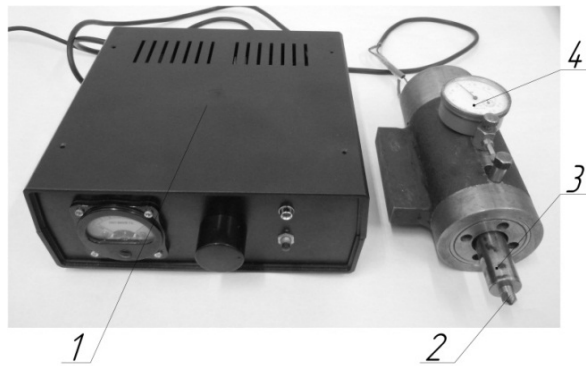


Рис. 1. Установка для УЗ выглаживания

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

Таблица 1

Режимы УЗ выглаживания

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

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 и универсального микроскопа МЕИТ Techno серии RZ.

Результаты исследования и их обсуждение. Исследования смазки на основе И20 с объемным содержанием медного порошка 12, 25 и 32 % проводились при температуре 20 °С и диапазоне градиентов скоростей течения 16-1320 с⁻¹. Реологические кривые строились в логарифмической системе координат, что позволило определить реологические константы в степенном законе Освальда-ДеВила [17, 18]:

$$\tau = K\dot{\gamma}^n,$$

где τ – напряжение сдвига, Па; K – мера консистенции жидкости; $\dot{\gamma}$ – градиент скорости течения жидкости, с^{-1} ; n – показатель степени, характеризующий неньютоновские свойства материалов.

Данный закон хорошо описывает кривые течения неньютоновских (дилатантных и псевдопластических) жидкостей.

Параметр n характеризует неньютоновские свойства материала. Из табл. 2 видно, что параметр n масла И20 немного отличный от 1, а значит, исследуемое масло имеет слабо выраженные свойства неньютоновской жидкости, а именно псевдопластичной жидкости.

Таблица 2

Результаты реологических исследований параметров k и n

Масло	Температура, °С	Реологические параметры	
		K	n
И20	20	0,1307	0,9608
И20+12%Cu	20	0,2801	0,9056
И20+25%Cu	20	0,6253	0,824
И20+32%Cu	20	0,6374	0,8485

С увеличением объемного содержания порошка меди показатель степени n уменьшается и принимает минимальное значение при объемном содержании меди 25-32 %.

На рис. 2 и рис. 3 представлены графики реологических кривых и графики зависимости динамической вязкости η смазки от градиента скорости течения $\dot{\gamma}$ при различном объемном содержании порошка меди соответственно.

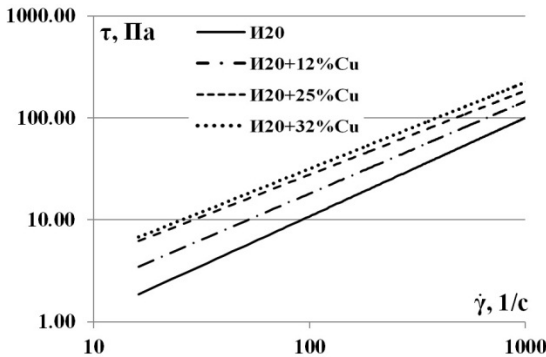


Рис. 2. Реологические кривые масла И20 с различным объемным содержанием порошка меди

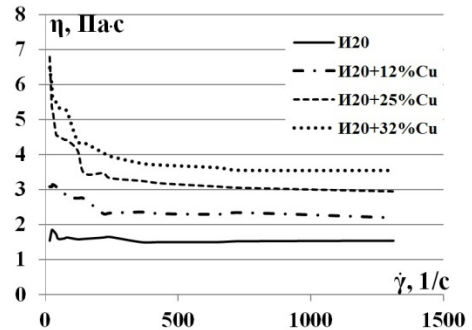


Рис. 3. Зависимость динамической вязкости η масла И20 с различным объемным содержанием порошка меди от градиента скорости течения

При градиентах скоростей $16-500 \text{ с}^{-1}$ вязкость смазок меняется не линейно. Максимальное увеличение вязкости смазки с различным содержанием порошка по сравнению с чистым маслом И20 соответствует градиенту скорости $16-20 \text{ с}^{-1}$ и имеет следующие значения: при 12% содержании порошка вязкость увеличивается в 2 раза, по сравнению с вязкостью масла И20, с $1,543 \text{ Па}\cdot\text{с}$ до $3,148 \text{ Па}\cdot\text{с}$, при 25 % 4,3 раза (с $1,543 \text{ Па}\cdot\text{с}$ до $6,481 \text{ Па}\cdot\text{с}$), а при 32 % в 4,5 раза (с $1,543 \text{ Па}\cdot\text{с}$ до $6,790 \text{ Па}\cdot\text{с}$).

При диапазонах градиентов скоростей $500-1312 \text{ с}^{-1}$ вязкость смазок изменяется незначительно. Динамическая вязкость смазок с 12 % содержанием порошка по сравнению с чистым маслом И20 увеличивается в 1,42 раза (с $1,543 \text{ Па}\cdot\text{с}$ до

2,3 Па·с), при 25 % в 1,94 раза (с 1,543 Па·с до 3 Па·с) и при 32 % в 2,26 раза (с 1,543 Па·с до 3,5 Па·с).

Так как при непосредственном проведении УЗ выглаживания при использовании смазки с порошком ее реологические свойства будут меняться при изменении скорости обработки образца, как следствие, будут меняться и параметры качества обработанных поверхностей и поверхностных слоев образцов.

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

Анализ профилограмм поверхностей (рис. 4-6) 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.

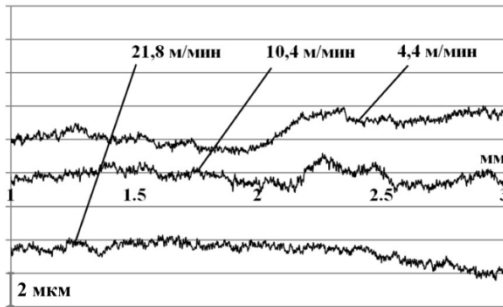


Рис. 4. Профилограммы поверхностей в зависимости от скорости обработки с маслом И20

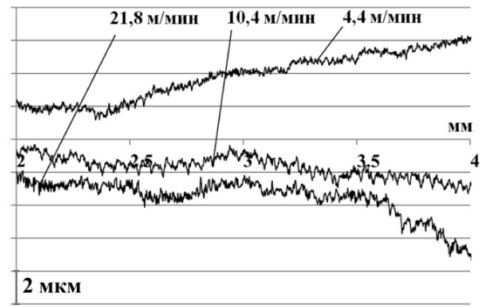


Рис. 5. Профилограммы поверхностей в зависимости от скорости обработки со смазкой И20+Cu

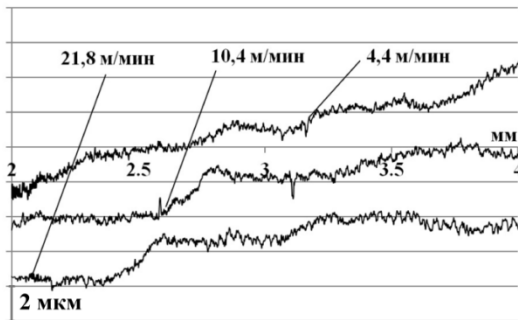


Рис. 6. Профилограммы поверхностей в зависимости от скорости обработки со смазкой И20+Al

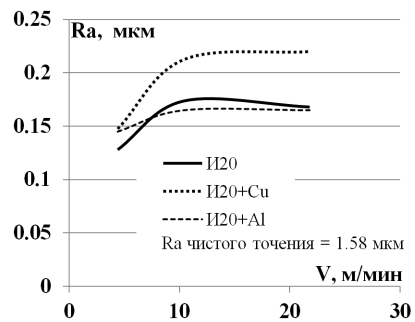


Рис. 7. Параметр шероховатости поверхности R_a при различных смазках в зависимости от скорости обработки V

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. 7). На этой скорости обработки при смазке И20 шероховатость поверхности составила $R_a = 0,125$ мкм.

При смазке, как с порошком меди, 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 поверхностей, 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.

Дробление зерен структуры металла поверхностного слоя (рис. 8, а) наблюдается на глубине до 100 мкм (рис. 8, б). На глубине до 2-6 мкм происходит интенсивное дробление структуры металла, зависящее от скорости обработки. Так, при УЗ выглаживании с постоянным статическим усилием с маслом И20 максимальное дробление наблюдается при всех скоростях обработки. В отличие от этого 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. 8, в) в тонком слое.

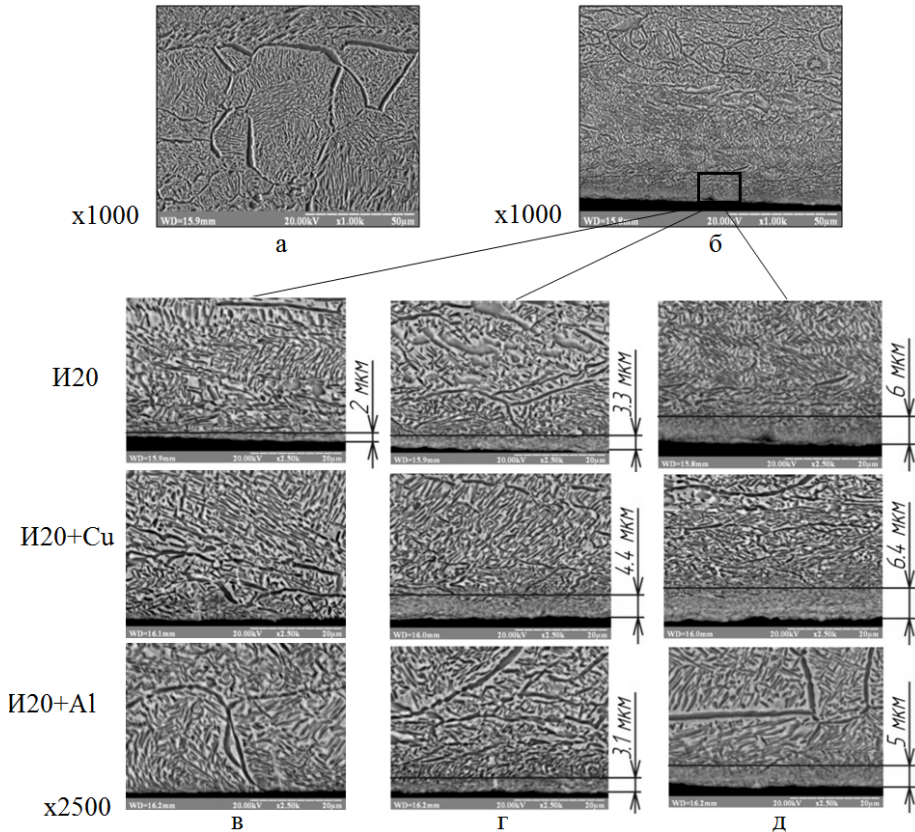


Рис. 8. Микроструктура поверхностного слоя металла образцов: а – исходная структура; б – структура после УЗ выглаживания; в, г, д – поверхностный слой после обработки с различными смазками и при скоростях обработки 4,4 м/мин, 10,4 м/мин и 21,8 м/мин соответственно

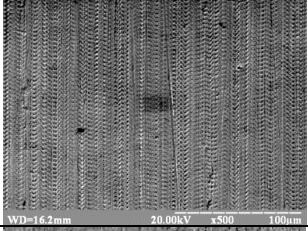
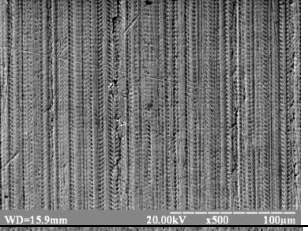
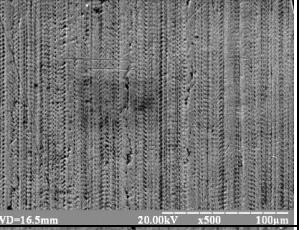
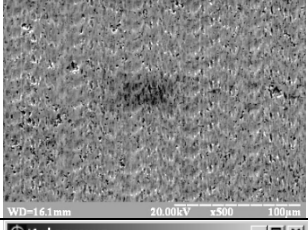
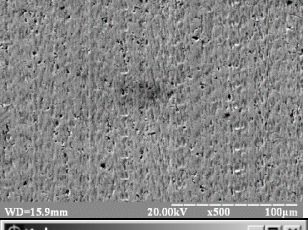
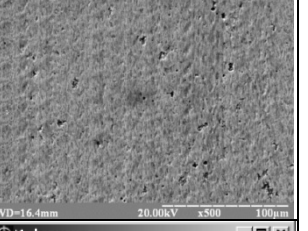
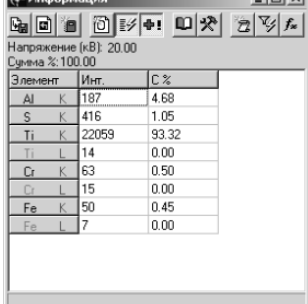
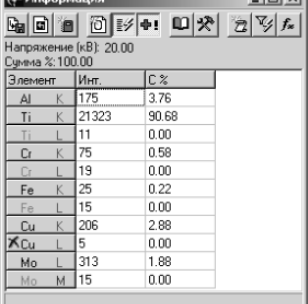
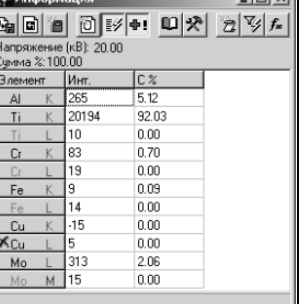
При скоростях 10,4 м/мин и 21,8 м/мин глубина максимального дробления структуры при всех 3 типах смазки составляет 5-7 мкм (рис. 8, г, д).

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.

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	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Элемент</th> <th>Инт.</th> <th>С %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Al K</td><td>187</td><td>4.68</td></tr> <tr><td>S K</td><td>416</td><td>1.05</td></tr> <tr><td>Ti K</td><td>22059</td><td>93.32</td></tr> <tr><td>Ti L</td><td>14</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>Cr K</td><td>63</td><td>0.50</td></tr> <tr><td>Cr L</td><td>15</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>Fe K</td><td>50</td><td>0.45</td></tr> <tr><td>Fe L</td><td>7</td><td>0.00</td></tr> </tbody> </table>	Элемент	Инт.	С %	Al K	187	4.68	S K	416	1.05	Ti K	22059	93.32	Ti L	14	0.00	Cr K	63	0.50	Cr L	15	0.00	Fe K	50	0.45	Fe L	7	0.00	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Элемент</th> <th>Инт.</th> <th>С %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Al K</td><td>175</td><td>3.76</td></tr> <tr><td>Ti K</td><td>21323</td><td>90.68</td></tr> <tr><td>Ti L</td><td>11</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>Cr K</td><td>75</td><td>0.58</td></tr> <tr><td>Cr L</td><td>19</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>Fe K</td><td>25</td><td>0.22</td></tr> <tr><td>Fe L</td><td>15</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>Cu K</td><td>206</td><td>2.88</td></tr> <tr><td>Cu L</td><td>5</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>Mo L</td><td>313</td><td>1.88</td></tr> <tr><td>Mo M</td><td>15</td><td>0.00</td></tr> </tbody> </table>	Элемент	Инт.	С %	Al K	175	3.76	Ti K	21323	90.68	Ti L	11	0.00	Cr K	75	0.58	Cr L	19	0.00	Fe K	25	0.22	Fe L	15	0.00	Cu K	206	2.88	Cu L	5	0.00	Mo L	313	1.88	Mo M	15	0.00	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Элемент</th> <th>Инт.</th> <th>С %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Al K</td><td>265</td><td>5.12</td></tr> <tr><td>Ti K</td><td>20194</td><td>92.03</td></tr> <tr><td>Ti L</td><td>10</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>Cr K</td><td>83</td><td>0.70</td></tr> <tr><td>Cr L</td><td>19</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>Fe K</td><td>9</td><td>0.09</td></tr> <tr><td>Fe L</td><td>14</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>Cu K</td><td>-15</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>Cu L</td><td>5</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>Mo L</td><td>313</td><td>2.06</td></tr> <tr><td>Mo M</td><td>15</td><td>0.00</td></tr> </tbody> </table>	Элемент	Инт.	С %	Al K	265	5.12	Ti K	20194	92.03	Ti L	10	0.00	Cr K	83	0.70	Cr L	19	0.00	Fe K	9	0.09	Fe L	14	0.00	Cu K	-15	0.00	Cu L	5	0.00	Mo L	313	2.06	Mo M	15	0.00
Элемент	Инт.	С %																																																																																																				
Al K	187	4.68																																																																																																				
S K	416	1.05																																																																																																				
Ti K	22059	93.32																																																																																																				
Ti L	14	0.00																																																																																																				
Cr K	63	0.50																																																																																																				
Cr L	15	0.00																																																																																																				
Fe K	50	0.45																																																																																																				
Fe L	7	0.00																																																																																																				
Элемент	Инт.	С %																																																																																																				
Al K	175	3.76																																																																																																				
Ti K	21323	90.68																																																																																																				
Ti L	11	0.00																																																																																																				
Cr K	75	0.58																																																																																																				
Cr L	19	0.00																																																																																																				
Fe K	25	0.22																																																																																																				
Fe L	15	0.00																																																																																																				
Cu K	206	2.88																																																																																																				
Cu L	5	0.00																																																																																																				
Mo L	313	1.88																																																																																																				
Mo M	15	0.00																																																																																																				
Элемент	Инт.	С %																																																																																																				
Al K	265	5.12																																																																																																				
Ti K	20194	92.03																																																																																																				
Ti L	10	0.00																																																																																																				
Cr K	83	0.70																																																																																																				
Cr L	19	0.00																																																																																																				
Fe K	9	0.09																																																																																																				
Fe L	14	0.00																																																																																																				
Cu K	-15	0.00																																																																																																				
Cu L	5	0.00																																																																																																				
Mo L	313	2.06																																																																																																				
Mo M	15	0.00																																																																																																				

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

При химическом анализе тонкого поверхностного слоя (1-10 мкм), соответствующего максимальному дроблению структуры при скорости обработки 21,8 м/с (рис. 9), установлено, что увеличение доли Cu происходит с 0 % до 0,65 % (после обработки).

Изменение химического состава тонкого приповерхностного слоя при скорости обработки 4,4 м/мин не происходит. Увеличения доли Al и Cu в химическом

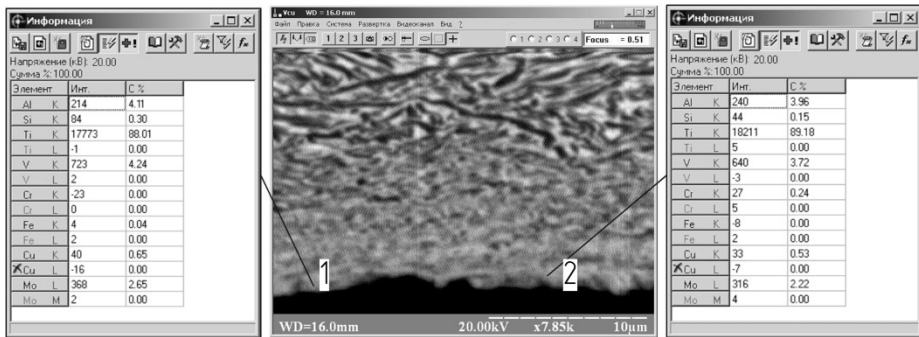


Рис. 9. Химический состав тонкого поверхностного слоя детали при УЗ выглаживании со смазкой И20 +Сц, $\times 7850$

составе тонкого приповерхностного слоя может свидетельствовать о разграничении контактирующих поверхностей выглаживателя и детали слоем металло-содержащей смазки. При достижении определенных скоростей обработки за счет сил трения происходит внедрение частиц металла в приповерхностный слой толщиной до 1-2 мкм.

Наиболее перспективным при обработке выглаживанием является создание условий гидродинамического или рубежного режима гидродинамического трения между инструментом и заготовкой при обработке. При этом коэффициент трения может быть достигнут в пределах 0,01...0,05. В случае рубежного режима гидродинамического трения происходит сглаживание шероховатости микро-рельефа поверхности при наличии тонкого слоя жидкой смазки. Определяющим фактором достижения этих условий трения является значительное увеличение скорости обработки при выглаживании, при которой гидродинамическое давление смазки будет уравнивать деформирующие удельные усилия на контактной поверхности, в ряде случаев превышающие предел текучести металла обрабатываемой заготовки.

В реальных условиях реализуется, видимо схема смешанного контакта поверхностей с участием как жидкостного, так и граничного трения.

Контактное взаимодействие инструмента с поверхностью детали при наличии металло-содержащей смазки можно представить в виде схемы, показанной на рис. 10.

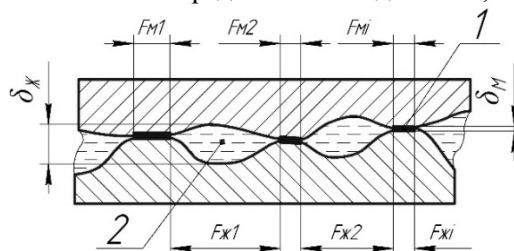


Рис. 10. Схема зоны контакта поверхностей инструмента и детали:

1 – разделительный подслои микропорошка металла; 2 – металло-содержащая смазка

В зоне контакта поверхности могут соприкасаться по вершинам выступов, а во впадинах – заключаться смазка под давлением большим, чем максимальное гидростатическое давление в момент времени, когда выступы еще не соприкасались. Учитывая наличие пластичной металлической составляющей в смазке, эти компоненты выжимаются из смазки на поверхностях выступов, образуя разделительный слой между поверхностями инструмента и детали.

Таким образом, движение инструмента вдоль поверхности детали реализуется по разделительному подслою микрочастиц металла смазки на участках F_{mi} и по жидкостной подушке с гидростатическим подпором на участке $F_{жсi}$. В этом случае может быть реализован единый теоретический подход к определению сдвигающего напряжения на контактной поверхности, которое определяет силу трения и соответственно, коэффициент трения.

Исходя из основных уравнений механики сплошной среды величина напряжения сдвига τ_{ij} будет пропорциональна скорости сдвига ε_{ij} материальных частиц промежуточной среды (жидкости или металла)

$$\tau_{ij} = k\varepsilon_{ij}(\delta),$$

где k – коэффициент, устанавливающий связь между компонентами тензора напряжений и деформаций среды, которая деформируется; i, j – индексы системы координат; δ – толщина разделительного промежуточного слоя металла, которая является сложной функцией микрорельефа поверхности.

При этом максимальная величина зазора определяется соотношением:

$$\delta_{\max} = \delta_M + R_{ZI} + R_{ZD},$$

где δ_M – толщина разделительного подслоя металла; R_{ZI}, R_{ZD} – соответственно шероховатость поверхности инструмента и детали.

Так для участков, в которых взаимодействие осуществляется по слою смазки, коэффициент пропорциональности равен динамической вязкости η , которая определяется по методике работы. Возникающие при этом погрешности аналитического определения напряжения сдвига за счет сложного профиля микрообъема жидкости (смазки), пьезоэффекта вязкости смазки, теплового и других эффектов по оценкам не превышают 20-35 %.

Для участков, в которых взаимодействие осуществляется по разделительному подслою микрочастиц металла смазки (F_{mi}), коэффициент пропорциональности определяется из теории пластического течения металлов и равен:

$$k = \frac{1}{3} \frac{\sigma_{II}}{\varepsilon_{II}},$$

где ε_{II} – интенсивность скоростей деформаций металла подслоя; σ_{II} – интенсивность напряжений, которую с достаточной степенью точности можно принять равной пределу текучести металла подслоя – σ_S . Тогда напряжения сдвига на этих участках описывается зависимостью:

$$k = \frac{1}{3} \frac{\sigma_S}{\varepsilon_{II}} \varepsilon_{ij}(\delta_M).$$

В соответствии с этим расчетная модель взаимодействия на контактной поверхности инструмент-деталь может быть представлена графически (рис. 11).

Диаграмма показывает три случая взаимодействия инструмента с деталью, которые могут возникать в зависимости от ранее рассмотренных режимов выглаживания. Наряду с описанным ранее I и III случаем взаимодействия наиболее вероятным является переходной случай взаимодействия с участком F_{mi} и $F_{жсi}$. Напряжение сдвига для этого случая может быть установлено с использованием принципа аддитивности по формуле:

$$\tau_{ij} = \left(a\eta + b \frac{\sigma_S}{3\varepsilon_{II}} \right) \varepsilon_{ij}(\delta),$$

где $a = \frac{1}{F_0} \sum_n F_{жн}$ и $b = \frac{1}{F_0} \sum_m F_{мм}$ - весовые коэффициенты ($a + b = 1$).

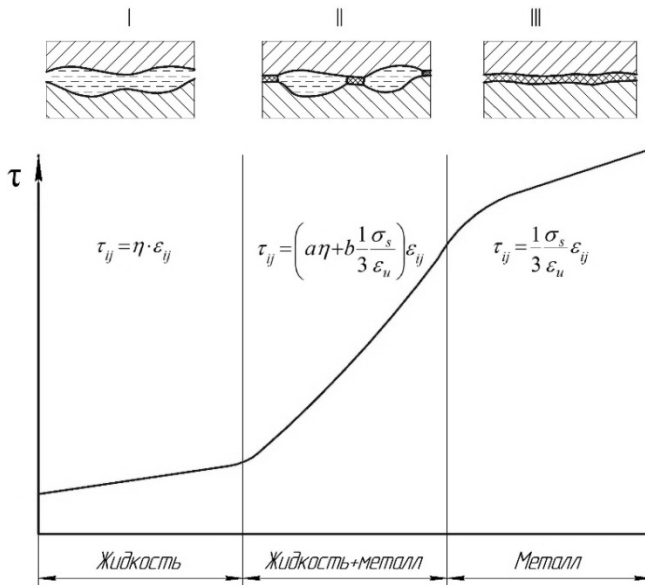


Рис. 11. Диаграмма зависимости напряжения сдвига на контактной поверхности «инструмент-деталь»

Предложенная модель контактного взаимодействия инструмента и детали показывает, что напряжения сдвига на контактной поверхности будут, как правило, больше по величине, чем при чистом гидродинамическом взаимодействии. А следовательно усредненный коэффициент трения также будет иметь значения выше, чем при гидродинамическом режиме трения.

Снижение величины коэффициента трения может достигаться применением в качестве микропорошков для металлосодержащей смазки металлов с низкими механическими характеристиками предела текучести. В этом случае перспективным является, например, технически чистый алюминий, эффективность применения которого показана в данной работе.

Выводы:

1. 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.

2. 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 $R_a = 0,17-0,18 \text{ мкм}$ достигается при использовании смазок И20 и И20+Al, а шероховатость $R_a = 0,22-0,23 \text{ мкм}$ при использовании И20+Cu. Анализ фактуры поверхности показал, что при использовании смазки И20+Al на

деформированной поверхности отсутствуют следы предварительной обработки чистовым точением.

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

4. 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.

5. Рассмотрена модель взаимодействия контактирующих поверхностей инструмента (выглаживателя) и детали при выглаживании в присутствии металлосодержащей смазки. Показано, что напряжения сдвига в смазочном слое металлосодержащей смазки при контакте скольжения двух тел будет суммой напряжений сдвига в жидкой фазе разделяющей поверхности контакта и напряжений сдвига пластичной металлической фазы в местах контакта неровностей поверхностей.

6. Установлено, что управление контактным взаимодействием на поверхности инструмента и детали позволяет влиять на коэффициент трения за счет изменения вязкости и скорости их взаимодействия.

Список литературы

1. Богуслаев В. А. Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД / Богуслаев В. А., Яценко В. К., Притченко В. Ф. – К.: Манускрипт, 1993. – 333 с.
2. Иванова В. С. Природа усталости металлов / В. С. Иванова, В. Ф. Терентьев. – М.: Металлургия, 1975. – 456 с.
3. К вопросу разработки технологических смазок для деформирующего протягивания деталей из сплава ВТ 1-0 / [Розенберг О. А., Пашенко Е. А., Шейкин С. Е., Ростоцкий И. Ю.] // Технологические системы. – 2007. - № 2(38). – С. 27-32.
4. Титов А. В. Особенности алмазного выглаживания сплава ВТ-23 с использованием твердой смазки / А. В. Титов, Т. М. Лабур, А. Л. Пузырёв // Вестник НТУУ «КПИ». Машиностроение. – К.: НТУУ «КПИ». – 2008. – № 53. – С. 202-207.
5. Корни Н. К. Фрикционные свойства поверхностей, разделенных пленкой твердого смазочного покрытия / Н. К. Корни // Вестник УГАТУ. Машиностроение. – 2012. - №4(49). – С. 13-17.
6. Крагельский И. В. Трение и износ. / И. В. Крагельский // М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
7. Чихос Х. Системный анализ в трибонике / Х. Чихос // М.: Мир, 1982. – 352 с.
8. Кужаров А. А. Триботехнические свойства нанометрических кластеров меди / А. А. Кужаров // Диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Ростов-на-Дону. 2004.
9. Kotnarowski A. Searching for Possibilities of Lubricating and Cutting Fluids Modification with Copper Micro- and Nanopowders / A. Kotnarowski // Materials science. - Vol. 12. - No. 3. - 2006. - p.p. 202-208.
10. Титов В. А. Некоторые перспективные направления развития процессов выглаживания конструкционных материалов / В. А. Титов, А. В. Титов // Вісник НТУ «ХПИ», - Харків – 2009. – №32. – С. 78-86.
11. Кораблин А. В. Повышение износостойкости подшипников скольжения судовых двигателей внутреннего сгорания / А. В. Кораблин, А. Ф. Сафиулин // Вестник АГТУ. Сер. Морская техника и технология. – 2013. -№2. – С. 111-118.

12. 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.
13. Повышение износостойкости деталей поверхностным пластическим деформированием с помощью ультразвуковых крутильных колебаний / Г. А. Осипенкова, В. Ф. Пегашкин, И. Е. Филимонов // Вестник машиностроения. – 2009. – №2. – С. 74-75.
14. Петровская Т. С. Комплексная обработка поверхностей титана / Т. С. Петровская // Известия ВолгГТУ. – 2009. – №11(59). – С. 71-73.
15. Богуслаев В. А. Формирование поверхностного слоя деталей выглаживанием с ультразвуковым нагружением / В. А. Богуслаев, В. А. Титов, А. Я. Качан, А. Ф. Луговской и др. // Монография. – Запорожье: Изд. АО «Мотор Сич», 2012. – 236 с.
16. Титов В. А. / Особенности алмазного выглаживания сплава ВТ-22 с дополнительным ультразвуковым воздействием на инструмент // В. А. Титов, В. А. Никитенко, А. В. Титов, А. А. Пливак, А. Д. Лавриненков // Обработка материалов давлением. – 2009. – №1(20). – С. 166-172.
17. Рабинович Е. З. Гидравлика / Е. З. Рабинович // М.: Недра, 1980. – 279 с.
18. Уилкинсон У. Л. Неньютоновские жидкости. Гидромеханика, перемешивание и теплообмен. Перевод с английского / У. Л. Уилкинсон // М.: Мир, 1964. – 216 с.

Стаття надійшла до редакції 05.06.2014

В. А. ТИТОВ, А. Д. ЛАВРИНЕНКОВ, О. В. ГЕРАСИМОВА

**ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ МЕТАЛОВМІСНОГО ЗМАЩЕННЯ НА КОНТАКТНУ
ВЗАЄМОДІЮ ІНСТРУМЕНТУ З ПОВЕРХНЕЮ ДЕТАЛІ ПРИ
УЛЬТРАЗВУКОВОМУ ВИГЛАДЖУВАННЯМ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ**

Виконано дослідження параметрів якості поверхневого шару (шорсткості поверхні, мікроструктури, хімічного складу) після ультразвукового вигладжування титанового сплаву ВТ22 з використанням металовмісного мастила. Досліджено реологічні властивості мастила на основі масла I20 з добавками мікропорошків міді та алюмінію. Встановлено, що при обробці між інструментом і поверхнею деталі формується проміжний шар металовмісного мастила, що підтверджується збільшенням частки пластичного металевого наповнювача в хімічному складі поверхні деталі. Розглянуто модель контактної взаємодії інструменту з поверхнею деталі при вигладжуванні з металовмісним мастилом, яка враховує наявність пластичного проміжного шару.

Ключові слова: ультразвукове вигладжування, металовмісних мастило, титанові сплави, модель контактної взаємодії.

V. A. TITOV, A. D. LAVRINENKOV, O. V. GERASYMOVA

FEATURES OF THE INFLUENCE OF A METAL-CONTAINING LUBRICANT ON THE CONTACT BETWEEN THE SURFACE OF THE TOOL AND THE SURFACE OF A DETAIL DURING ULTRASONIC BURNISHING OF TITANIUM ALLOYS

The research of quality parameters of the surface layer (surface roughness, microstructure, chemical composition) after ultrasonic burnishing of titanium alloy VT22 using metal-containing lubrication was carried out. The rheological properties of oil based at the lubricant I20 with addition of copper and aluminum micropowders were studied. It was established that during treatment between the tool and the surface of detail the intermediate layer of metal-containing lubrication is formed, it is confirmed by increasing of lubricant's plastic metal at the chemical composition of the surface of detail. We considered a model of contact interaction between the surface of the instrument and the surface of detail during burnishing with the presence of metal-containing lubricant which implies the presence of plastic interlayer. It is shown that the use of metal-containing lubricants expands technological modes of ultrasonic burnishing of titanium alloys by increasing the speed of processing and the specific forces of deformation in which there will not be the adhesive seizure between indenter and detail's surface.

Keywords: ultrasound burnishing, metal-containing lubricant, titanium alloys, contact interaction model.

Титов Вячеслав Андреевич – д-р. техн. наук, профессор, заведующий кафедры механики пластичности материалов и ресурсосберегающих процессов, Национальный технический университет Украины «КПИ», г. Киев, Украина, v.a.titov@list.ru.

Лавриненков Антон Дмитриевич – ассистент кафедры механики пластичности материалов и ресурсосберегающих процессов, Национальный технический университет Украины «КПИ», г. Киев, Украина.

Герасимова Ольга Вячеславовна – инженер, Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина, NAU12@ukr.net.