

УДК 612.431.75

О. В. ГЕРАСИМОВА¹, В. А. ТИТОВ²¹Национальный авиационный университет, Украина²Национальный технический университет Украины «КПИ», Украина

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНЫ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТАЛЛОСОДЕРЖАЩЕЙ СМАЗКИ В ПРОЦЕССАХ ВЫГЛАЖИВАНИЯ

В статье описано теоретическое исследование процесса взаимодействия деформирующего инструмента с поверхностью детали при выглаживании с применением металлосодержащей смазки, которая эффективна для обработки деталей из титановых сплавов. Получены аналитические зависимости устанавливающие связь коэффициента трения с соотношением механических свойств металлов детали и дисперсной компоненты смазки, а также величиной сдвиговых деформаций в поверхностном слое детали. Установлено, что применение металлов дисперсного компонента смазки с меньшими механическими свойствами, чем у металла детали снижает величину коэффициента трения и повышает эффективность процесса.

Ключевые слова: выглаживание, металлосодержащая смазка, предельный коэффициент трения, деформация поверхностного слоя, титановые сплавы.

Введение. Обеспечение эффективности эксплуатации конструкций из титановых сплавов поверхностным пластическим деформированием, в частности, выглаживанием, имеет ряд трудностей, связанных с их адгезионными свойствами, малой теплопроводностью, склонностью их к холодному свариванию с инструментом [1; 2]. Одним из путей решения этой научно-прикладной задачи машиностроения является применение металлосодержащих смазок [3; 4; 5].

Постановка задачи. В работе [5] авторами предложена физическая модель взаимодействия контактирующих поверхностей инструмента и детали при выглаживании в присутствии металлосодержащей смазки. Определено, что напряжения сдвига в смазочном слое металлосодержащей смазки при контакте скольжения инструмента по поверхности детали в общем случае будут суммой напряжений сдвига пластичной металлической фазы смазки и напряжений сдвига в жидкой фазе. Суммарная величина напряжений сдвига на контактной поверхности функционально взаимосвязана с коэффициентом трения, реализуемом в процессе обработки. Предельная величина коэффициента трения определяемая в рамках предложенной модели возникает при большом объемном содержании металлических наночастиц в металлосодержащей смазке, когда жидкостное взаимодействие на контактной поверхности минимально, а преобладающее влияние имеет взаимодействие инструмента и детали через промежуточный слой металлической фазы смазки.

В настоящей работе дается аналитическая оценка предельной величины коэффициента трения при использовании металлосодержащей смазки для процесса выглаживания, когда взаимодействие инструмента и поверхности детали реализуется через промежуточный слой металла – наполнителя металлической фазы смазки.

Результаты исследования и их обсуждение. Для определения коэффициента трения между инструментом и деталью рассмотрим процесс выглаживания при наличии металлосодержащей смазки в соответствии с рис. 1.

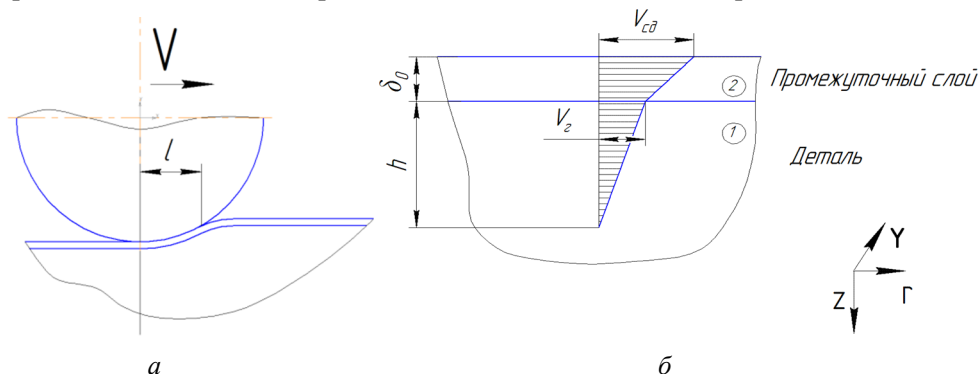


Рис. 1. Схема процесса выглаживания детали при наличии промежуточного металлического слоя между индентором и деталью: а – схема выглаживания, б – распределение радиальной компоненты вектора скорости перемещения при сдвиговой деформации поверхностного слоя (1) детали и промежуточного (2) слоя

Считаем, что между индентором и материалом детали имеется промежуточный слой пластичного металла, который неразрывно связан с основным материалом. Считаем также, что деформации сдвига проходят в промежуточном слое толщиной δ_0 , и поверхностном слое основного металла детали h . Принято также допущение, что максимальная глубина распространения деформаций сдвига основного металла равна глубине очага деформаций при вдавливании индентора h .

Считаем также, что деформации вдоль оси OY затруднены, поэтому в расчете принимаем деформированное состояние плоским.

Скорости перемещений в слоях 1 и 2 имеют различную величину и определяются механическими свойствами металлов этих слоев. При этом ввиду принятой гипотезы о прилипании металлических частиц слоя смазки 2 к поверхности детали 1, считаем, что скорости сдвига V_z на границе поверхностного 1 и промежуточного 2 слоев равны. Величина же этих скоростей перемещений по слоям различна.

Величина скорости перемещений V_{co} поверхности промежуточного слоя в месте контакта с инструментом отличается от скорости движения инструмента и определяется условиями трения на этой поверхности. Эта составляющая вектора скоростей перемещения материальных частиц слоев определяет деформацию сдвига в поверхностном слое при выглаживании.

Величина радиальной скорости перемещений компоненты сдвиговой деформации зависит от радиальной координаты r и осевой координаты Z . Это можно записать в виде произведения функций координат:

$$V_{cr} = f(r) \xi(z). \quad (1)$$

Рассмотрим отдельно деформацию поверхностного слоя материала (1) и промежуточного слоя (2).

Для основного слоя функцию (1) представлен в виде:

$$V_{cr1} = (A_1 r + B_1)(C_1 z + D_1) \quad (2)$$

Неизвестные коэффициенты A_1, B_1, C_1, D_1 определяем из граничных условий:

$$1) \text{ при } r = 0; z = \delta_0; V_{cr1} = V_z, \quad (3)$$

$$2) \text{ при } r = 0; z = \delta_0 + h; V_{cr1} = 0, \quad (4)$$

$$3) \text{ при } r = l; z = \delta_0; V_{cr1} = 0. \quad (5)$$

С учетом взаимной зависимости коэффициентов A_l и B_l функция радиальной скорости перемещений имеет вид:

$$V_{cr1} = V_z \left[1 - \frac{z - \delta_0}{h} \right] \left(1 - \frac{r}{l} \right). \quad (6)$$

Тангенциальную составляющую поля скоростей сдвига определяем из условия совместности деформаций:

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{V_r}{r} = 0. \quad (7)$$

После подстановки, преобразования и интегрирования, а также с учетом граничного условия:

$$\text{при } \theta = \frac{\pi}{2}, r = 0; V_{c\theta} = 0, \quad (8)$$

получаем:

$$V_{c\theta1} = V_z \left(1 - \frac{z - \delta_0}{h} \right) \left(\left(\frac{2r}{l} - 1 \right) \theta + \frac{\pi}{2} \right). \quad (9)$$

Используя дифференциальные соотношения между скоростями перемещений и скоростями деформаций, получим выражения для компонент скоростей деформаций сдвиговой составляющей:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{rr} &= \frac{V_z}{l} \left(\frac{z - \delta_0}{h} - 1 \right); \quad \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{1}{l} V_z \left(1 - \frac{z - \delta_0}{h} \right); \\ \varepsilon_{zr} &= \frac{V_z}{h} \left(\frac{r}{l} - 1 \right) \varepsilon_{r\theta} = -\frac{4}{l} V_z \left(1 - \frac{z - \delta_0}{h} \right) \theta; \\ \varepsilon_{\theta z} &= -\frac{1}{h} V_z \left[1 - \left(1 - \frac{2r}{l} \right) \theta \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

Аналогично определено поле скоростей перемещений для промежуточного слоя:

$$\begin{aligned} V_{cr2} &= \left(\frac{V_{cd}/V_z - 1}{h} (z - h) - 1 \right) \frac{(r - l)}{l}; \\ V_{c\theta2} &= \left(\frac{V_{cd}/V_z - 1}{h} (z - h) - 1 \right) \left(\left(1 - \frac{2r}{l} \right) \theta - \frac{\pi}{2} \right); \\ V_{cz2} &= 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Скорость сдвига на граничной поверхности V_z определено из условия совместности деформаций:

$$V_z = \frac{\sigma_{s2} h}{\sigma_{s1} \delta_0 + \sigma_{s2} h} V_{cd}, \quad (12)$$

где σ_{s1} и σ_{s2} – пределы текучести соответственно 1 и 2 слоев

Составляющую V_{cd} в выражении (12) определена из условия баланса мощностей процесса выглаживания и деформации сдвига поверхностного слоя, которое в дифференциальном виде можно записать:

$$dN_{инд} = dN_{cd}, \quad (13)$$

где $N_{инд}$ – мощность воздействия инструмента на заготовку; N_{cd} – мощность деформации сдвига в поверхностном слое детали.

Учитывая, что

$$dN_{инд} = f_{mp} \sigma_n V dF, \quad (14)$$

а мощность пластической деформации сдвига в поверхностном слое:

$$dN_{cd} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_s \cdot V_{cd} \cdot dF. \quad (15)$$

Подставляя (14) и (15) в (13), получаем:

$$V_{cd} = \sqrt{3} f_{mp} V. \quad (16)$$

В выражении (16) принято допущение, что при выглаживании величина контактных напряжений σ_n достигает предела текучести σ_s материала промежуточного слоя.

Компоненты тензора скоростей деформаций промежуточного слоя получены путем дифференцирования составляющих вектора скоростей по координатам с использованием выражений (11) и учетом (16):

$$\begin{aligned} \varepsilon_{rr} &= \frac{1}{l} \sqrt{3} V f_{mp} \frac{\sigma_{s2} h}{\sigma_{s1} \delta_0 + \sigma_{s2} h} \left(\frac{z - \delta_0}{h} - 1 \right); \\ \varepsilon_{\theta\theta} &= \frac{1}{l} \sqrt{3} V f_{mp} \frac{\sigma_{s2} h}{\sigma_{s1} \delta_0 + \sigma_{s2} h} \left(1 - \frac{z - \delta_0}{h} \right); \\ \varepsilon_{zr} &= \frac{1}{h} \sqrt{3} V f_{mp} \frac{\sigma_{s2} h}{\sigma_{s1} \delta_0 + \sigma_{s2} h} \left(\frac{r}{l} - 1 \right); \\ \varepsilon_{r\theta} &= -\frac{4}{l} \sqrt{3} V f_{mp} \frac{\sigma_{s2} h}{\sigma_{s1} \delta_0 + \sigma_{s2} h} \left(1 - \frac{z - \delta_0}{h} \right) \theta; \\ \varepsilon_{\theta z} &= -\frac{1}{h} \sqrt{3} V f_{mp} \frac{\sigma_{s2} h}{\sigma_{s1} \delta_0 + \sigma_{s2} h} \left[1 - \left(1 - \frac{2r}{l} \right) \theta \right]. \end{aligned} \quad (17)$$

На рис. 2 представлена зависимость скорости деформации сдвига $\varepsilon_{zr/l}$ от коэффициента трения при различных соотношениях механических свойств материалов детали и промежуточного слоя, образованного дисперсным включением металлосодержащей смазки.

Как видно из рис. 2 на величину трения при использовании металлосодержащих смазок влияет соотношение механических свойств металлов детали и дисперсной компоненты смазки. При уменьшении механических свойств (предела текучести) дисперсного металлической фазы, образующего промежуточный слой, происходит уменьшение коэффициента трения. Это способствует увеличению устойчивости процесса выглаживания.

Увеличение механических свойств металла дисперсной металлической фазы смазки приводит к увеличению коэффициента трения и соответственно деформаций сдвига в поверхностном слое детали.

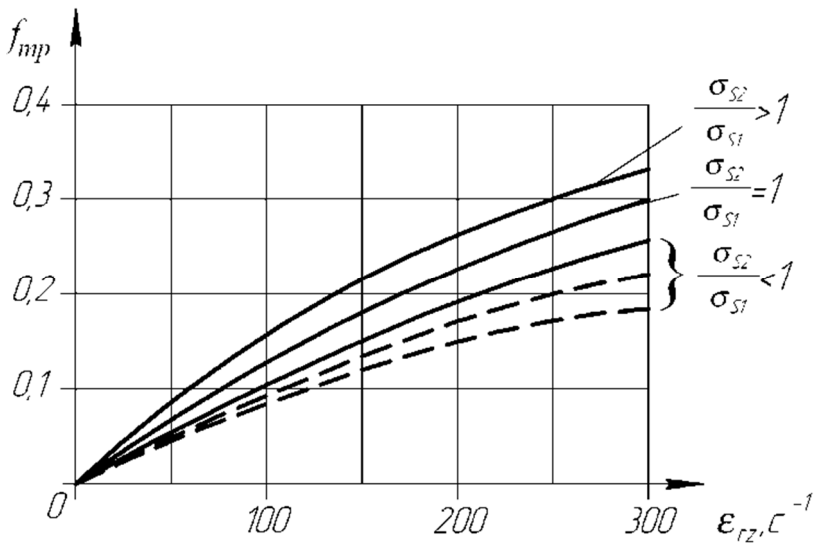


Рис. 2. Зависимость деформаций сдвига ε_{rz1} от коэффициента трения f_{mp} при различных отношениях мех. свойств σ_{s1}/σ_{s2} поверхностного и промежуточного слоев

Вывод. Таким образом получены аналитические соотношения, устанавливающие взаимосвязь коэффициента трения с соотношением механических свойств металлов детали и дисперсной металлической фазы металлосодержащей смазки, позволяют управлять не только коэффициентом трения, но и прогнозировать деформированное состояние поверхностного слоя деталей после выглаживания. Полученные закономерности могут быть распространены и на другие процессы поверхностного пластического деформирования, такие как деформирующее протягивание, обкатка и другие.

Список литературы

1. Розенберг О. А. К вопросу разработки технологических смазок для деформирующего протягивания деталей из сплава ВТ 1-0 / О. А. Розенберг, Е. А. Пашенко, С. Е. Шейкин, И. Ю. Ростоцкий // Технологические системы. – 2007. – № 2(38). – С. 27–32.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Титов В. А. Особенности влияния металлосодержащей смазки на контактное взаимодействие инструмента с поверхностью детали при ультразвуковом выглаживании титановых сплавов / В. А. Титов, А. Д. Лавриненков, О. В. Герасимова // Проблеми тертя та зношування – К.: НАУ, 2014. – С. 41–51.

О. В. ГЕРАСИМОВА, В. А. ТИТОВ,

**АНАЛІТИЧНА ОЦІНКА ГРАНИЧНОЇ ВЕЛИЧИННИ КОЕФІЦІЄНТА ТЕРТЯ ПРИ
ВИКОРИСТАННІ МЕТАЛОВМІСНОГО ЗМАЩЕННЯ
У ПРОЦЕСАХ ВИГЛАДЖУВАННЯ**

У статті описано теоретичне дослідження процесу взаємодії деформуючого інструмента з поверхнею деталі при вигладжуванні із застосуванням металовмісного змащення, яке ефективно для обробки деталей з титанових сплавів. Отримані аналітичні залежності встановлюють зв'язок коефіцієнта тертя з співвідношеннями механічних властивостей металів деталі та дисперсної компоненти мастила, а також величиною зсувів в поверхневому шарі деталі. Встановлено, що застосування металів дисперсного компонента змащення з меншими механічними властивостями, ніж у металу деталі знижує величину коефіцієнта тертя і підвищує ефективність процесу.

Ключові слова: вигладжування, металовмісне мастило, граничний коефіцієнт тертя, деформація поверхневого шару, титанові сплави.

Герасимова Ольга Вячеславовна – інженер, Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина, Dellta@ukr.net.

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

O. V. GERASYMOVA, V. A. TITOV

ANALYTICAL EVALUATION OF LIMIT VALUES OF FRICTION FACTOR DURING BURNISHING WITH METAL-CONTAINING LUBRICANT

The theoretical research of the interaction the surface with deforming tool parts at burnishing with metal-containing lubricant, which is effective for the treatment of parts made of titanium alloys, is described in the article. The analytical dependence relationship set the coefficient of friction of relations mechanical properties of metal parts and components of the dispersed lubricant, and the largest displacement in the surface-layer details was carried out. It was established that the use of metal particulate component with lower mechanical properties than metal parts reduces the coefficient of friction and improves the efficiency of the process.

Keywords: burnishing, metal-containing lubricant, limit values of friction factor, deformation of surface layer, titanium alloys.

References

1. Rozenberg O. A.K voprosu razrabotki tehnologicheskikh smazok dlja deformirujushhego protjagivaniya detalej iz splava VT 1-0 / O. A. Rozenberg, E. A. Pashhenko, S. E. Shejkin, I. Ju. Rostockij // *Tehnologicheskie sistemy*. – 2007. - № 2(38). – С. 27-32.
2. Titov A. V. Osobennosti almaznogo vyglazhivaniya splava VT-23 s ispol'zovaniem tverdoj smazki / A. V. Titov, T. M. Labur, A. L. Puzyrjov // *Vestnik NTUU «KPI». Mashinostroenie*. – K.: NTUU «KPI». – 2008. – № 53. – S. 202-207.
3. 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.
4. Korablin A. V. Povyshenie iznosostojkosti podshipnikov skol'zhenija sudovyh dvigatelej vnutrennego sgoraniya / A. V. Korablin, A. F. Safiulin // *Vestnik AGTU. Ser. Morskaja tehnika i tehnologija*. – 2013. -№2. – S. 111-118.
5. Titov V.A. Osobennosti vlijaniya metallosoderzhashhej smazki na kontaktnoe vzaimodejstvie instrumenta s poverhnost'ju detali pri ul'trazvukovom vyglazhivanii titanovyh splavov / V.A. Titov, A.D. Lavrinenkov, O.V. Gerasimova // *Problemi tertja ta znoshuvannja* – K.: NAU, 2014. – S. 41-51.