

УДК 612.431.75

А.В. Титов, м.н.с.,  
НТУ України «Київський політехнічний інститут», г.Київ, Україна

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫГЛАЖИВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЗА СЧЕТ УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТНЫМИ И СИЛОВЫМИ ПАРАМЕТРАМИ НАГРУЖЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА

*На основі комплексного дослідження процесу виглажджування встановлено значущі фактори контактної взаємодії інструменту та заготовки, які формують параметри якості деталей. Запропоновані розрахункова схема та постановка задачі гідродинамічної взаємодії індентора з поверхнею деталі.*

*Burnishing process is complex researched. Significant factors of contact interaction of instrument and detail which making parameters of quality is established. Analytical model and problem formulation of hydrodynamic interaction of instrument and detail is introduced.*

Важнейшей задачей современного машиностроения является обеспечение эксплуатационных характеристик (надежности и ресурса) изделий, таких как летательные аппараты, двигатели, автомобили и других. Преждевременный отказ изделий, как правило, носит усталостный характер. Как известно [1, 2], зарождение усталостной трещины начинается с поверхности заготовки или в приповерхностном слое. Поэтому, эксплуатационные характеристики изделий в значительной степени зависят от качества поверхности деталей. Для обеспечения этих характеристик на финишных операциях изготовления деталей изделий производят их обработку методами поверхностного пластического деформирования (ППД) [3, 4]. Для ассимметричных деталей наиболее эффективным методом ППД является алмазное выглаживание.

В то же время, одним из путей повышения эффективности эксплуатации конструкций изделий является использование материалов с более высокой прочностью и жесткостью при хорошей коррозионной стойкости и сопротивлении усталостным нагрузкам, например, титановые сплавы.

Однако, выглаживание титановых сплавов с их малой теплопроводностью, высокой адгезионной способностью склонностью к холодному свариванию с инструментом имеет ряд трудностей [3, 5]. В процессе выглаживания резко возрастают силы трения между заготовкой и инструментом, повышается тепловыделение в зоне их контакта. Это приводит к увеличению шероховатости поверхности, ее надрывам, снижению стойкости инструмента – выглаживателя.

Только комплексный анализ факторов влияющих на параметры качества деталей изделий позволяет обеспечить эффективность выглаживания различных конструкционных материалов, в том числе титановых сплавов.

Решение вопросов обеспечения эффективности выглаживания различных конструкционных материалов, в том числе титановых сплавов, возможно только при комплексном анализе факторов влияющих на параметры качества деталей изделий и системном развитии процессов.

В статье рассмотрена актуальная научно-техническая задача – формирование перспективных направлений развития процессов выглаживания для обеспечения качества и ресурса деталей из титановых сплавов и других конструкционных материалов.

Снижение коэффициента трения на контактной поверхности инструмента-деталь возможно достигнуть за счет управления скоростными и силовыми параметрами нагружения инструмента.

В работе рассмотрено процесс выглаживания путем скольжения головки инструмента-индентора по поверхности деталей и не рассматриваются процессы выглаживания, при которых инструмент обкатывается по поверхности деталей [6, 7, 8]. В процессах обкатывания отсутствуют силы трения скольжения, они заменяются на трение качения. Поэтому этот процесс является одним из предельных для процессов выглаживания и в целом для отделочно-упрочняющих обработок ППД.

Основным преимуществом процесса выглаживания индентором является возможность получения пластическим деформированием упрочненного слоя значительной глубины, наличие которого обеспечивает повышение ресурса эксплуатации деталей и изделий в целом [4, 9, 10].

Комплексный анализ процесса выглаживания [17] позволил установить основные значимые факторы контактного взаимодействия инструмента и заготовки, которые формируют параметры качества поверхностного слоя детали в зависимости от технологических параметров процесса, которые показаны на рис. 1. К ним можно отнести:

1) удельное усилие контактного взаимодействия выглаживателя на поверхности детали в зоне очага деформации;

2) контактное трение, которые возникают при движении инструмента между поверхностью детали и выглаживателем.

Удельное усилие контактного взаимодействия определяются силой выглаживания отнесенной к площади контакта выглаживателя с деталью [8].

Их величина пропорциональна глубине вдавливания и определяет толщину упрочненного слоя, оценка величины которой определена в работе [11]. Взаимосвязанные с упрочнением параметры качества поверхностного слоя, такие как микроструктура и остаточные напряжения, изменяются незначительно в зависимости от количества проходов. Необходимо отметить, что в приповерхностном слое происходит значительное дробление зерен исходного материала. Степень дробления зависит от величины удельного усилия выглаживания.



Рис. 1. Взаимосвязь технологических параметров процесса выглаживания при формировании параметров качества обработанной детали

Основной задачей выглаживания является создание остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое:

1) На силовом уровне они образуются в следствии неравномерности деформаций по толщине (глубине) материала (напряжения 1го рода), который выглаживается. Сочетание нелинейной пластичности при формировании и линейных деформаций разрушения (здесь может быть использована теорема о разгрузке или другие принципы, например минимизации упругой энергии).

2) На физическом уровне они проявляются в следствии упрочнения материала (напряжения 3го рода) и дробления и взаимодействия его зерен (напряжения 2го рода).

Величина максимальных остаточных напряжений определяет уровень предела выносливости материала  $\sigma_{-1}$  в упрочненном состоянии, а эффективность упрочнения оценивается коэффициентом упрочнения

$$\beta = \frac{\sigma_{-1упр}}{\sigma_{-1исх}} \quad (1)$$

Таким образом, регулируя величину максимальных остаточных напряжений и упрочнения в приповерхностном слое, можно управлять пределом выносливости материала и ресурсом изделия (вала, цилиндра и прочее), которое подвергнуто обработке выглаживанием.

Поэтому влияние первого значимого фактора прогнозировать можно, как на основании экспериментальных данных, так и обобщать теоретически, например [11].

Точность определения величины упрочнения и остаточных напряжений можно обеспечить дальнейшим учетом параметров процесса выглаживания, реальной формы площадки контакта, динамического характера напряжения и других. Это является одним из наиболее важных теоретических направлений развития процессов выглаживания.

Более сложным в теоретическом аспекте является второй значимый фактор контактного взаимодействия – контактное трение между заготовкой и инструментом. Оно возникает при движении выглаживателя по поверхности заготовки и влияет на характер и величину деформаций приповерхностного слоя детали.

Процесс выглаживания – сложный процесс, так как деформирование поверхностного слоя сопровождается развитием деформаций по глубине вследствие вдавливания инструмента (влияния первого фактора), а также развитием деформаций сдвига вследствие скольжения выглаживателя по поверхности детали. Это видно на металлографии, представленной на рис. 2, где в приповерхностном слое наблюдается не только дробление зерен, но и вытягивание зерен в направлении движения инструмента.

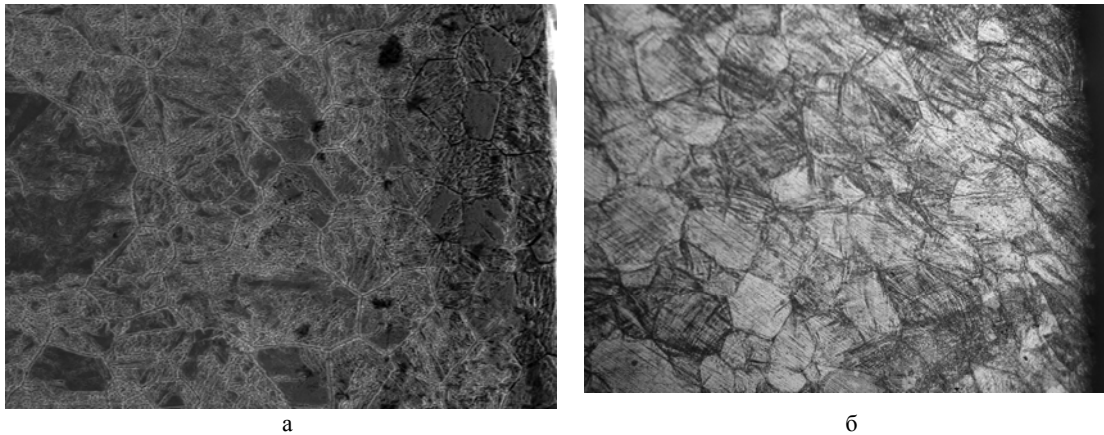


Рис. 2. Металлография образцов после обработки алмазным выглаживанием:  
а – сталь; б – титановый сплав

Как показывает анализ изменения исходной структуры материала, сдвиговые деформации определенной величины оказывают положительное влияние на структуру материала, это проявляется в дополнительном дроблении зерен в приповерхностном слое в условиях интенсивных пластических деформаций с образованием дисперсных и субмикродисперсных структур с величиной зерна 20...30 мкм и менее. Это повышает прочностные и пластические свойства материала приповерхностного слоя с одновременным увеличением его твердости. Этот факт также отмечен в работах [3]. Развитие этих деформаций также на наш взгляд способствует залечиванию поверхностных микродефектов при развитии и накоплении дислокаций, что показывают результаты испытаний образцов методами внутреннего трения [12].

Влияние сдвиговых деформаций в теоретическом аспекте исследовано не достаточно. Поэтому авторами [17] предложен подход основанный на описании кинематики процесса деформирования и определении НДС и энергосиловых параметров процесса с использованием замкнутой системы уравнений сплошных сред [13]. В этой постановке кинематически процесс деформирования при выглаживании включает перемещение материальных частиц поверхностного слоя по глубине и движение (смещение) их вдоль образующей инструмента:

$$\vec{V}_0 = \vec{V}_{\theta 0} + \vec{V}_{c0}, \quad (2)$$

где  $\vec{V}_0$ ,  $\vec{V}_{\theta 0}$ ,  $\vec{V}_{c0}$  – векторы скорости перемещений материальных частиц в очаге деформации, соответственно общий, за счет вдавливания инструмента, сдвига за счет сил трения

Составляющие поля скоростей вдавливания используем из работы [11]. А составляющие поля скоростей сдвига выбираем из условий:

- максимального значения сдвиговых составляющих на вертикальной оси (вдавливания инструмента);
- равенства нулю сдвиговых составляющих на свободной поверхности заготовки.

Тогда компоненты вектора общего поля скоростей имеют вид:

$$\begin{aligned} V_z &= \frac{V^2(t_k - t)l}{\pi Rr} \left(1 - \frac{z}{kl}\right)^2 \sin \frac{\pi r}{l}; \\ V_r &= \frac{V^2(t_k - t)l}{\pi^2 kRr} \left(1 - \frac{z}{kl}\right)^2 \left(1 - \cos \frac{\pi r}{l}\right) + V_c \left(1 - \frac{r}{l}\right); \\ V_\theta &= V_c \left(1 - \frac{z}{h}\right) \left[\frac{\pi}{2} - \left(1 - \frac{2r}{l}\right)\theta\right], \end{aligned} \quad (3)$$

где

- $V$  – скорость инструмента при обработке выглаживанием;
- $V_c$  – скорость сдвига материальных точек поверхностного слоя;
- $t$  – время обработки;
- $R$  – радиус заточки инструмента;
- $k$  – коэффициент глубины распространения деформации  $k=1.5...2.0$ ;
- $l$  – радиус контактного пятна контакта инструмента с поверхностью заготовки;
- $h$  – глубина распространения сдвиговых деформаций;
- $t_k = l/V$ .

Величина  $V_c$  и  $h_0$  определяется с использованием минимизации энергии деформирования материала в очаге деформации.

Предлагаемая модель процесса подтверждается расчетами в системе ANSYS по распределению деформаций, удельной работе деформирования и контактному удельному усилию [18].

В результате численного моделирования показано также, что при величине коэффициента трения на контактной поверхности более 0,25...0,35 происходит сдвиг по всех поверхности с увеличением и накоплением деформаций во внеконтактной зоне. Это приводит к разрушению тонкого поверхностного слоя заготовки, что ограничивает возможность реализации процесса выглаживания. Такой эффект характерен для выглаживания

титановых сплавов ввиду их высокой адгезии, в том числе к материалам выглаживателя: природному алмазу, поликристаллам алмаза, твердым сплавам и другим.

Поэтому направление работ по прогнозированию деформаций в реальных условиях взаимодействия с учетом сдвиговых компонент является необходимым для обеспечения требуемого качества поверхности детали ППД.

Очевидной является необходимость управления силами трения на контактной поверхности. Это направление работ приобретает в настоящее время приоритетное значение поскольку позволит проектировать процессы выглаживания для любых конструкционных материалов.

Экспериментальные и теоретические оценки показывают, что величина коэффициента трения на контактной поверхности не должна превышать 0,2...0,25. Это соответствует процессам, протекающим в условиях граничного трения или адсорбционной смазки (по Б.В. Дерягину) [14, 15], когда на трущихся поверхностях образуются тонкие (молекулярные) слои пленок, как правило углеводородов (карбоксилы -COOH, гидроксилы -OH, аминогруппы и др.). Эти пленки за счет высоких адсорбционных свойств закрепляются на поверхностях трущихся тел и не разрушаются при очень высоких давлениях.

Снижение коэффициента трения обеспечивает эффективность процесса выглаживания. Это может быть достигнуто при создании условий контактного взаимодействия, соответствующих гидродинамическому трению. Согласно теории гидродинамического трения (по Н.П. Петрову) [15], основными влияющими параметрами процесса взаимодействия являются – коэффициент вязкости смазки и скорость взаимного движения трущихся тел.

Экспериментально показано, что увеличение коэффициента вязкости смазок вплоть до использования твердых смазок дает положительный результат [3, 5]. В качестве твердых смазок могут быть использованы полимерные покрытия, тонкие (напыленные) слои металлов и другие, в том числе ионно-вакуумные многослойные покрытия. Недостатком применения твердых смазок является необходимость их удаления после выполнения операции выглаживания. Такие дополнительные операции не только увеличивают общую трудоемкость обработки, но и могут влиять на окончательные свойства поверхностного слоя обработанных деталей.

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 сглаживания шероховатости микрорельефа 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 уравновешивать деформирующие удельные усилия на контактной поверхности, в ряде случаев превышающие предел текучести материала обрабатываемой заготовки.

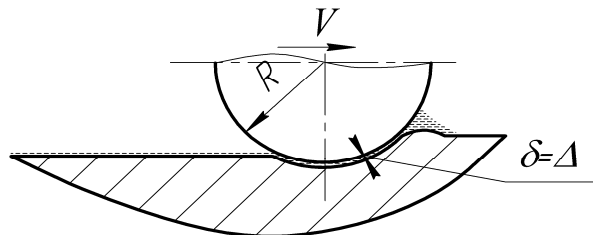


Рис. 3. Расчетная схема процесса выглаживания

$$p = \sigma_{rr} \quad (4)$$

где  $p$  – гидростатическое давление смазки между индентором и деталью;

$\sigma_{rr}$  – нормальное напряжение, действующее на контактной поверхности индентор-деталь при выглаживании.

В силу малости зазора между индентором и заготовкой считаем, что движение смазки имеет ламинарный режим, тогда составляющая радиальной скорости перемещений  $V_r = 0$ . Ввиду симметрии

рассматриваемого сечения также считаем осевую компоненту равной  $V_z = 0$ . Тангенциальная скорость  $V_\theta$  движения смазки в силу градиента давлений будет функцией координаты  $r$ .

$$V_z = V_r = 0, V_\theta = V_\theta(r) \quad (5)$$

В этом случае уравнения движения Навье-Стокса имеют вид:

$$\frac{\partial P}{\partial r} = \rho \frac{V_\theta^2}{r};$$

$$\frac{\partial P}{\partial \theta} = \eta r \left( \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial r} - \frac{V_\theta}{r^2} \right); \quad (6)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = 0.$$

Эти уравнения позволяют определять требуемое гидродинамическое давление.

Величина гидростатического давления определяется из известных уравнений движения жидкости Навье-Стокса [19]. При теоретическом анализе решалась плоская задача, при которой заменяли сегмент сферической поверхности взаимодействия заготовки с индентором сечением в плоскости  $r-\varphi$  по оси симметрии индентора, где действуют максимальные контактные давления (рис. 3). Поэтому это решение будет характеризовать верхнюю оценку режима гидродинамического взаимодействия.

Одним из путей управления скоростным фактором является использование дополнительного ультразвукового нагружения инструмента. В работе [16] экспериментально показано, что использование дополнительного ультразвукового нагружения инструмента при выглаживании заготовок из титановых сплавов ВТ-22 и ВТ-23 обеспечивает высокие параметры качества поверхностного слоя обработанной поверхности, таких как шероховатость, микроструктура и упрочнение приповерхностного слоя. Это достигается за счет значительного увеличения средней скорости обработки инструментом поверхности заготовки.

В результате проведенного анализа можно сделать следующие выводы, которые определяют перспективы развития процессов выглаживания:

1. На основании комплексного анализа процесса выглаживания установлены значимые факторы контактного взаимодействия инструмента и заготовки, которые формируют параметры качества деталей в зависимости от реализуемых параметров технологического процесса: удельное усилие взаимодействия инструмента с заготовкой и контактное трение на поверхности их взаимодействия.
2. Экспериментально показано, что остаточные напряжения, упрочнение поверхностного слоя заготовки и дробление структурных зерен зависит от величины усилия нагружения индентора. Приведена математическая модель, позволяющая прогнозировать деформационные и энергосиловые параметры процесса выглаживания, а также параметры качества поверхностного слоя.
3. Показано, что в теоретическом аспекте очень важно учитывать сдвиговые деформации на поверхности заготовки, которые дополнительно измельчают зерно (менее 20...30 мкм) и увеличивают прочностные и пластические характеристики приповерхностного слоя.
4. Установлено, что управление контактным взаимодействием инструмента и заготовки можно производить влияя на коэффициент трения за счет изменения вязкости смазки и скорости их взаимодействия. Наиболее благоприятным для реализации процесса выглаживания является рубежный режим гидродинамического трения между заготовкой и инструментом.
5. Обоснована постановка задачи гидродинамического взаимодействия с поверхностью детали. Приведена расчетная схема.
6. Экспериментально показано, что использование дополнительного ультразвукового нагружения инструмента при выглаживании заготовок из титановых сплавов ВТ-22 и ВТ-23 обеспечивает устойчивый процесс выглаживания с получением высоких параметров качества поверхностного слоя деталей.
7. Описанные в статье научно-технические направления являются перспективными для дальнейшего развития процессов выглаживания.

#### Список литературы

1. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов - М.: «Металлургия», 1975, 456 с.
2. Трошенко В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. - К.: Наукова думка, 1981. - 341 с.
3. Розенберг О.А. 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. Богуслав В.О., Качан О.Я., Яценко В.К. та інші. Технологія виробництва авіаційних двигунів. Частина III. Методи обробки деталей авіаційних двигунів – Видавн. ВАТ «Мотор Січ», Запоріжжя, 2008 р. – 639 с.
5. 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.
6. Папшев Д.Д. Отделочно - упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. - М.: Машиностроение, 1978. - 152 с.
7. Торбило В.М. Алмазное выглаживание. - М.: Машиностроение, 1972. – 105 с.
8. Чепя П.А. Технологические основы упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. - Минск: Наука и техника, 1981. - 128 с.
9. Чепя П.А., Андрияшин В.А. Эксплуатационные свойства упрочненных деталей. - Минск: Наука и техника, 1988. – 192 с.
10. Богуслав В.А., Яценко В.К., Притченко В.Ф. Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД. – К.: Манускрипт, 1993. - 333 с.
11. Мозговой В.Ф. Оценка оптимизированных технологических параметров процесса алмазного выглаживания при изготовлении валов ГТД / Мозговой В.Ф., Качан А.Я., Титов В.А. и др. // Технологические системы. - 2001. - № 5. - С.78-85.
12. Мозговой О.В. Вплив деформаційної та ізотермічної обробки на амплітудну залежність внутрішнього тертя сталі 07Х12Н2МБФ / Мозговой О.В., Качан О.Я., Титов А.В., Богуслав О.В. // Вестник двигателестроения. – 2005. – № 1. – С. 99-102.
13. Алексеев Ю.Н. Введение в теорию обработки металлов давлением, прокаткой и резанием. - Харьков: Изд-во ХГУ, 1969. - 108 с.
14. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. – М.: Гос. из-во физ.-мат. лит., 1963. - 472с.
15. Крагельский И.В. Трение и износ. - М.: Машиностроение, 1968.- 480 с.
16. Титов А.В. Некоторые особенности формирования свойств поверхностного слоя при ультразвуковом выглаживании / Титов А.В., Хохлова Ю.А., Лавриненков А.Д. // Вестник НТУУ «КПИ». Машиностроение. – К.: НТУУ «КПИ». – 2009. – № 56. – С. 140-147.
17. Титов В.А. Некоторые перспективные направления развития процессов выглаживания конструкционных материалов / Титов В.А., Титов А.В. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ» - 2009. - № 32. – С. 78-86.
18. Титов А.В. Моделирование процесса алмазного выглаживания с использованием системы ANSYS / Титов А.В., Мозговой С.В., Качан А.Я. // Вестник двигателестроения. – 2006. - № 4. – С. 90-96.