

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ГЛУБИНЫ УПРОЧНЁННОГО СЛОЯ ПО ВЕЛИЧИНЕ КОНТАКТНОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ РЕВЕРСИВНОМ ВЫГЛАЖИВАНИИ ИНСТРУМЕНТОМ ИЗ РАЗНЫХ СТАЛЕЙ

Нгуен Хыу Хай¹, Чан Ван Минь²

¹Офицерское училище Военно-Воздушных Сил, Нячанг, Вьетнам;

²Военный институт кораблестроения Вьетнама, Ханой, Вьетнам

Ключевые слова: реверсивное выглаживание, напряженно-деформированное состояние, контактное давление, метод конечных элементов, глубина упрочненного слоя, интенсивность остаточных напряжений.

Аннотация. В работе исследовано влияние материала рабочего инструмента на контактное давление при реверсивном выглаживании и его связь с параметрами поверхностного упрочнения. Методом конечных элементов выполнено моделирование процесса с использованием инструментов из сталей Ст45, 40Cr, 42CrMo4 и SKD-11. Установлены зависимости максимальной интенсивности остаточных напряжений и глубины упрочнённого слоя от среднего контактного давления. Полученные результаты показывают возможность оценки данных параметров по величине контактного давления.

EVALUATION OF RESIDUAL STRESSES AND HARDENED-LAYER DEPTH FROM CONTACT PRESSURE DURING REVERSE BURNISHING WITH TOOLS MADE OF DIFFERENT STEELS

Nguyen Huu Hai¹, Tran Van Minh²

¹Air Force Officer College, Nha Trang, Vietnam;

²Military Institute of Ship Design, Ha Noi, Vietnam

Keywords: reverse burnishing, stress-strain state, contact pressure, finite element method, hardened-layer depth, residual stress intensity.

Abstract. This study investigates the effect of tool material on contact pressure during reverse burnishing and its relationship with surface strengthening characteristics. Finite element simulations were performed for burnishing tools made of hardened St45, 40Cr, 42CrMo4, and SKD-11 steels. The relationships between the maximum residual stress intensity, hardened-layer depth, and mean contact pressure were established. The results demonstrate that both residual stresses and hardened-layer depth increase with increasing contact pressure, indicating that contact pressure can be used as an integral parameter for estimating the surface strengthening characteristics produced by reverse burnishing.

Эксплуатационная надёжность и долговечность деталей машин, работающих в условиях циклических и динамических нагрузок, во многом определяются состоянием их поверхностного слоя [1]. Формирование в поверхностном слое благоприятных остаточных напряжений, повышенной твёрдости и упрочнённой зоны является одним из эффективных способов повышения усталостной прочности и износостойкости деталей.

Одним из перспективных методов поверхностного пластического деформирования является выглаживание, при котором перемещение гладкого

инструмента по поверхности детали сопровождается возникновением контактного давления и локальной пластической деформацией материала [2]. При реверсивном выглаживании дополнительно изменяется направление тангенциального нагружения, что приводит к особенностям формирования напряжённо-деформированного состояния и, как следствие, остаточных напряжений и упрочнённого слоя.

Ключевым параметром контактного взаимодействия при выглаживании является контактное давление (P). Его величина определяет интенсивность пластической деформации поверхностного слоя и непосредственно связана с формированием остаточного напряжённого состояния и глубиной упрочнения. При недостаточном давлении пластическая деформация может быть недостаточной для формирования требуемого уровня упрочнения, тогда как чрезмерное давление способно вызвать повреждение поверхностного слоя и ухудшение эксплуатационных характеристик детали [3]. Поэтому установление взаимосвязи между контактным давлением, остаточными напряжениями и глубиной упрочнённого слоя представляет практический и научный интерес.

Результаты выглаживания зависят не только от технологических параметров и геометрии инструмента, но и от его механических свойств. При этом влияние материала инструмента на величину контактного давления и связанные с ним параметры упрочнённого слоя изучено недостаточно. Особенно актуальным является сравнительный анализ инструментов, изготовленных из сталей с различными механическими характеристиками [4].

Прямое экспериментальное определение контактного давления в зоне взаимодействия инструмента с заготовкой представляет значительные технические трудности. В связи с этим применение метода конечных элементов позволяет эффективно исследовать контактное взаимодействие, определить распределение давления и установить его связь с формированием напряжённого состояния поверхностного слоя.

Целью настоящей работы является оценка остаточных напряжений и глубины упрочнённого слоя по величине контактного давления при реверсивном выглаживании инструментами из различных сталей. Для достижения поставленной цели исследуется влияние механических свойств материала инструмента на контактное давление и устанавливается возможность использования его величины в качестве параметра для оценки результатов поверхностного упрочнения.

Результаты моделирования и оценка параметров упрочнённого слоя.

Методика построения конечно-элементной модели реверсивного выглаживания подробно изложена в работе [2]. В настоящем исследовании выполнено численное моделирование процесса для четырёх вариантов материала рабочего инструмента: закалённой стали Ст45, 40Cr, 42CrMo4 и инструментальной стали SKD-11. На основе результатов расчёта проведён анализ контактного давления как основного параметра, определяющего

формирование остаточных напряжений и глубину упрочнения поверхностного слоя.

На рисунке 7 представлена зависимость максимальной интенсивности остаточных напряжений $\sigma_i^{\text{ост}}$ от среднего контактного давления $P_{\text{ср}}$, полученная по результатам конечно-элементного моделирования реверсивного выглаживания инструментами из различных сталей.

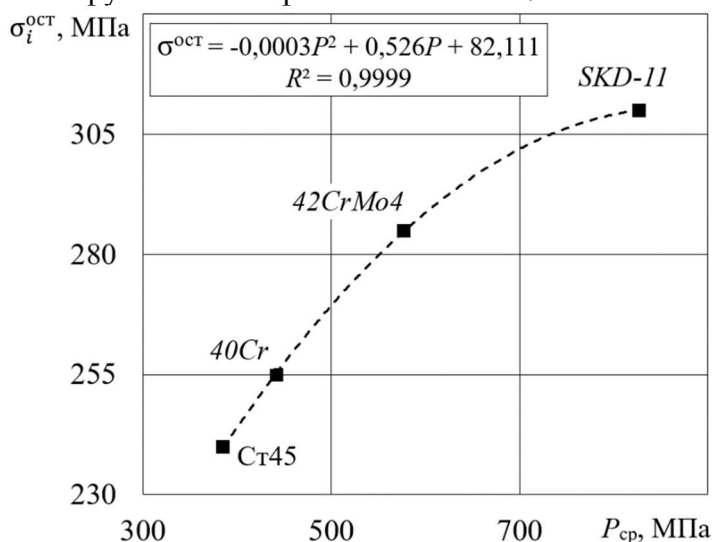


Рис. 1. Зависимость максимальной интенсивности остаточных напряжений от среднего контактного давления

Как видно из рисунка 7, увеличение среднего контактного давления сопровождается закономерным повышением уровня остаточных напряжений в поверхностном слое. При изменении $P_{\text{ср}}$ от 385 до 827 МПа величина $\sigma_i^{\text{ост}}$ возрастает примерно с 237 до 310 МПа. Полученная зависимость аппроксимируется выражением:

$$\sigma_i^{\text{ост}} = -0,0003(P_{\text{ср}})^2 + 0,526 P_{\text{ср}} + 82,111$$

при $R^2 = 0,9999$.

Высокое значение коэффициента детерминации свидетельствует о тесной взаимосвязи между контактным давлением и уровнем остаточных напряжений. Следовательно, среднее контактное давление может быть использовано в качестве расчётного параметра для оценки остаточного напряжённого состояния поверхностного слоя при реверсивном выглаживании.

Другим важным показателем эффективности поверхностного упрочнения является глубина упрочнённого слоя h . Зависимость данного параметра от среднего контактного давления представлена на рисунке 2. С увеличением $P_{\text{ср}}$ наблюдается существенное увеличение глубины упрочнения. При повышении среднего контактного давления с 385 до 827 МПа глубина упрочнённого слоя возрастает примерно с 0,21 до 0,98 мм. Такой характер изменения связан с увеличением интенсивности пластической деформации и распространением зоны пластического течения на большую глубину материала.

Полученные результаты описываются зависимостью:

$$h = 3E-06(P_{cp})^2 - 0,0015P_{cp} + 0,3753$$

при $R^2 = 0,9997$, что указывает на высокую степень соответствия аппроксимирующей зависимости результатам численного моделирования.

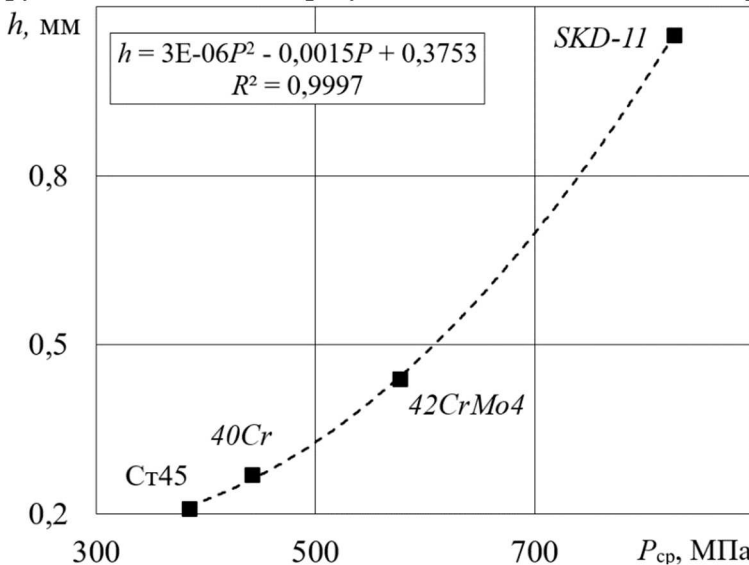


Рис. 2. Зависимость глубины упрочнённого слоя от среднего контактного давления

Таким образом, установлено, что увеличение среднего контактного давления при реверсивном выглаживании приводит как к повышению уровня остаточных напряжений, так и к увеличению глубины упрочнённого слоя. При этом изменение материала инструмента от Ст45 до 40Cr, 42CrMo4 и SKD-11 сопровождается ростом контактного давления и соответствующим изменением параметров упрочнения. Полученные зависимости позволяют рассматривать P_{cp} как интегральный параметр, на основе которого возможно оценивать остаточные напряжения и глубину упрочнённого слоя без непосредственного определения этих характеристик для каждого варианта инструмента.

Заклучение

На основе конечно-элементного моделирования установлено, что среднее контактное давление является определяющим параметром формирования упрочнённого слоя при реверсивном выглаживании. При его увеличении с 385 до 827 МПа максимальная интенсивность остаточных напряжений возрастает с 237 до 310 МПа, а глубина упрочнённого слоя - с 0,21 до 0,98 мм. Полученные зависимости характеризуются высокими коэффициентами детерминации ($R^2 = 0,9999$ и $R^2 = 0,9997$), что подтверждает возможность использования среднего контактного давления для оценки основных характеристик упрочнения. Полученные результаты могут быть использованы для выбора материала инструмента и технологических параметров процесса реверсивного выглаживания.

Список литературы

1. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 2002. – 299 с.
2. Нгуен Хыу Хай. Повышение эффективности упрочнения цилиндрических деталей машин реверсивным выглаживанием. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Иркутск, 2024. – 207 с.
3. Кузнецов В.П., Макаров А.В., Скоробогатов А.С., Скорынина П.А., Лучко С.Н., Сирош В.А., Чекан Н.М. Влияние нормальной силы на сглаживание и упрочнение поверхностного слоя стали 03X16H15M3T1 при сухом алмазном выглаживании сферическим индентором // Обработка металлов. – 2022. – Т. 24, №4. – С. 6-22.
4. Хыу Хай Нгуен, С.А. Зайдес. Влияние материала рабочего инструмента на напряженно-деформированное состояние деталей при реверсивном выглаживании // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2026. – №6(795). – С. 48-59.

References

1. Smelyansky V.M. Mechanics of Strengthening Machine Parts by Surface Plastic Deformation. – M.: Mechanical Engineering, 2002. – 299 p.
2. Nguyen Huu Hai. Improving the Efficiency of Cylindrical Machine-Part Strengthening by Reversible Burnishing: Abstract of the diss. ... cand. of tech. sc. – Irkutsk, 2024. – 207 p.
3. Kuznetsov V.P., Makarov A.V., Skorobogatov A.S., Skorynina, P.A., Luchko S.N., Sirosh V.A., Chekan N.M. Effect of Normal Force on Smoothing and Surface-Layer Strengthening of 03Kh16N15M3T1 Steel during Dry Diamond Burnishing with a Spherical Indenter // Metal Working. 2022, vol. 24, no. 4, pp. 6-22.
4. Nguyen Huu Hai, Zaides S.A. Effect of Tool Material on the Stress–Strain State of Parts during Reversible Burnishing // Proceedings of Higher Educational Institutions. Mechanical Engineering. 2026, no. 6(795), pp. 48-59.

Нгуен Хыу Хай – кандидат технических наук, преподаватель	Nguyen Huu Hai – candidate of technical sciences, lecturer
Чан Ван Минь – магистр технических наук, исследователь	Tran Van Minh – master candidate of technical sciences, researcher
nquan6799@gmail.com	

Received 10.09.2026