

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ СЖАТИЯ В УПРОЧНЕННОМ СЛОЕ КОЛЕС ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ТРАНСМИССИЙ МОБИЛЬНОГО ТРЕЛЕВОЧНОГО ТРАКТОРА ТТР-401 М ПОСЛЕ ИХ УПРОЧНЕНИЯ

*Пищов М.Н., Бельский С.Е., Сурус А.И., Царук Ф.Ф.*

*Белорусский государственный технологический университет, г. Минск*

**Ключевые слова:** остаточные напряжения, зубчатые передачи, упрочнение, детали трансмиссии, трелевочный трактор, износостойкость, разрушение, упрочненный слой, динамические нагрузки, микротвердость.

**Аннотация.** На основе анализа условий эксплуатации мобильных лесозаготовительных машин, определены повреждения, которые появляются в результате интенсивного износа деталей трансмиссий. Изучена микротвердость поверхностных слоев. Предложена методика экспериментального определения остаточных напряжений в упрочненном слое зубчатых колес трелевочного трактора после проведения борирования и боросилицирования. В результате чего доказана целесообразность применения их в качестве упрочнения тяжело нагруженных и быстроизнашивающихся зубчатых колес деталей трансмиссий лесных мобильных машин.

## INVESTIGATION OF RESIDUAL COMPRESSIVE STRESSES IN THE HARDENED LAYER OF GEAR WHEELS OF TRANSMISSIONS OF THE TTR-401 M MOBILE SKIDDING TRACTOR AFTER HARDENING

*Pishchov M.N., Belsky S.E., Surus A.I., Tsaruk F.F.*

*Belarusian State Technological University, Minsk*

**Keywords:** residual stresses, gears, hardening, transmission details, skidder, wear resistance, failure, hardened layer, dynamic loading, microhardness.

**Abstract.** Based on the analysis of the operating conditions of mobile forestry machines, the damages that occur as a result of intensive wear of transmission parts have been identified. The microhardness of the surface layers was studied. A technique is proposed for the experimental determination of residual stresses in the hardened layer of gear wheels of a skidder after borating and borosilicating. As a result, the feasibility of using them as a hardening of heavily loaded and wearing gears of transmission parts of forest mobile machines has been proved.

В настоящее время на заготовке древесины предпочтение отдается колесным машинам, обладающим по сравнению с гусеничными лучшей управляемостью и маневренностью, более высокими скоростными показателями, эргономическими качествами и надежностью, меньшей металлоемкостью и затратами на обслуживание. Разрушение контактных поверхностей конических зубчатых колес переднего ведущего моста трелевочного трактора ТТР-401 М при его эксплуатации, как уже отмечалось, связано с образованием на зубьях пластических деформаций. Так, остаточные напряжения растяжения в ходе длительного воздействия на микротрещины вызывают их увеличение до критических значений, при которых резко снижается прочность и износостойкость деталей, что в итоге приводит к разрушению всей поверхности. С учетом остаточных напряжений сжатия можно оценивать предельные размеры

и скорость усталостных трещин, а, следовательно, и долговечность всей детали в целом. В работах [1-4] показано, что остаточные напряжения сжатия существенно замедляют рост образования усталостных трещин. Таким образом, остаточные напряжения сжатия в области локальных пластических деформаций будут замедлять процессы разрушения, протекающие, как правило, с образованием остаточных напряжений растяжения. В ходе исследований было изучено влияние составов смеси, а также температурно-временных параметров различных процессов упрочнения на распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя. Определялся как уровень остаточных напряжений, так и их знак.

Установлено, что характер распространения остаточных напряжений по глубине слоя практически одинаковый для разных процессов упрочнения. Максимальных значений остаточные напряжения сжатия достигают на поверхности упрочнения. Установлено, что величина и знак остаточных напряжений в основе металла зависят от термической обработки. Так при закалке образцов остаточные напряжения в основе металла являются сжимающими, что повышает прочность основы [4].

Для подтверждения теоретических расчетов модели было проведено экспериментальное определение характера распределения остаточных напряжений в упрочненных различными методами диффузионных слоях на косых шлифах образцов размерами 10×10×10 мм методом рентгеноструктурного анализа на установке фирмы Bruker (рисунок 1).

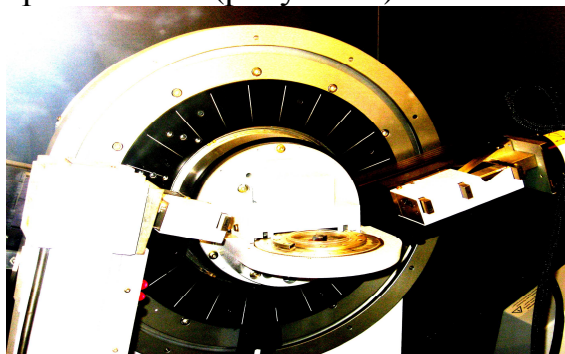


Рис. 1. Установка для проведения рентгеноструктурного анализа фирмы Bruker

Микронапряжения связаны с неоднородной упругой деформацией кристаллической решетки металла и характеризуются величиной относительной микродеформации решетки  $\Delta a/a$  [5]:

$$\sigma_{II} = E \cdot \left( \frac{\Delta a}{a} \right) + \frac{E\beta}{4 \cdot R \cdot \operatorname{tg}\Theta}, \quad (1)$$

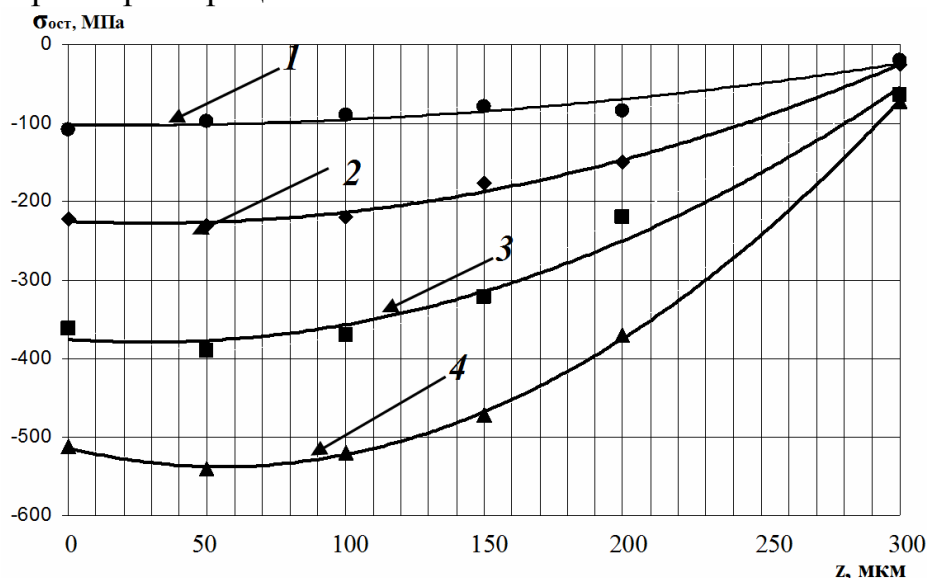
где  $E$  – модуль упругости, МПа;  $\beta$  – физическое уширение интерференционной линии;  $R$  – радиус камеры или радиус окружности, по которой движется счетчик (дифрактометр и т.д.), мм;  $\Theta$  – угол отражения соответствующей интерференционной линии. Диаметр блоков когерентного рассеяния в направлении, перпендикулярном кристаллографической плоскости, отражение от которой зафиксировано на дифрактограмме, определяется из соотношения:

$$D = \frac{0,94 \cdot \lambda \cdot R}{\beta \cdot \cos \Theta}, \quad (2)$$

Физическое уширение интерференционной линии  $\beta$  может быть определено при обработке рентгенограммы исследуемого образца и сравнении ее с рентгенограммой эталонного. Уширение вызвано неоднородностью излучения, геометрическими условиями съемки или структурными особенностями материала (микронапряжения, измельчение блоков, неоднородность химического состава и т.д.).

При обработке результатов рентгеновского анализа определяли ширину интерференционной линии на дифрактограмме, ее ширину с поправкой на немонохроматичность излучения и физическое уширение  $\beta$ , полученное после внесения поправки на геометрические условия съемки, так как ширина одноименной линии эталона обусловлена только геометрическими условиями съемки – инструментальным фактором. Для этого предварительным отжигом добивались снятия микронапряжений в эталоне и обеспечения величины блоков  $D$  более  $10^{-7}$  м.

На рисунке 2 представлены графики распределения остаточных напряжений сжатия по глубине упрочненных слоев, полученных с использованием изучаемых составов насыщения при различных температурно-временных параметрах процессов ХТО.



1–цементация; 2–азотирование; 3–боросилицирование; 4–борирование

Рис. 2. Распределение остаточных напряжений сжатия по глубине упрочненного слоя образцов стали 25ХГТ

Из графика видно, что в результате изменения удельных объемов при фазовых превращениях, различных коэффициентов линейного расширения материалов упрочненного слоя и основы металла возникают остаточные напряжения сжатия с большим градиентом по глубине поверхностного слоя, величина которого зависит от способа ХТО. Наибольших значений остаточные напряжения сжатия достигают при проведении борирования с температурой насыщения  $1050^{\circ}\text{C}$ . Для всех рассматриваемых составов и температурно-временных параметров поверхностного упрочнения максимальных значений остаточные напряжения достигают на поверхности образцов и уменьшаются при переходе к основе металла. При этом важно, чтобы переход к основе металла

осуществлялся без каких-либо скачков уровня остаточных напряжений сжатия. Было установлено, что с увеличением времени и температуры насыщения при проведении борирования и боросилицирования уровень остаточных напряжений сжатия повышается.

При этом с повышением температуры насыщения происходит увеличение уровня остаточных напряжений сжатия как на поверхности, так на глубине 150–200 мкм, что дополнительно повышает прочность и износостойкость упрочненного слоя.

Экспериментальные результаты свидетельствуют о достаточно равномерном распределении остаточных напряжений сжатия по глубине слоя, особенно при упрочнении методом боросилицирования, что хорошо согласуется, как уже отмечалось, с распределением микротвердости и микрохрупкости по глубине поверхностного слоя. Можно высказать предположение, что у такого упрочненного слоя должна быть прочная связь с основой металла. Это важно для работы деталей, работающих при высоких динамических нагрузках, таких как конические передачи трелевочных тракторов.

#### Список литературы

1. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 240 с.
2. Остаточные напряжения при электромагнитной наплавке / П.Н. Ящерицын и др. // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз-тэхн. навук. – 2000. – № 2. – С. 62-65.
3. Макаревич С.С. Модель напряженного состояния зубьев деталей трансмиссий трелевочных тракторов / С.С. Макаревич, М.Н. Пищов, С.Е. Бельский // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообработ. пром-сть. – 2009. – Вып. XVII. – С. 327–330.
4. Остаточные напряжения: учеб. пособие / Ж.А. Мрочек и др. – Минск, 2003. – С. 68-72.
5. Горелик С.С. Рентгенографический и электроннооптический анализ. – 2-е изд. – М.: Металлургия, 1970. – 368 с.

#### Сведения об авторах:

*Пищов Михаил Николаевич* – к.т.н., доцент кафедры материаловедения и проектирования технических систем, БГТУ, г. Минск;

*Бельский Сергей Евграфович* – к.т.н., доцент кафедры материаловедения и проектирования технических систем, БГТУ, г. Минск;

*Царук Федор Федорович* – к.т.н., доцент кафедры материаловедения и проектирования технических систем, БГТУ, г. Минск;

*Сурус Анатолий Иванович* – к.т.н., доцент кафедры материаловедения и проектирования технических систем, БГТУ, г. Минск;