

УДК 621.785.532

М. Н. Пищов, ассистент (БГТУ); С. Е. Бельский, канд. техн. наук, доцент (БГТУ)

### АНАЛИЗ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В УПРОЧНЕННОМ СЛОЕ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ТРЕЛЕВОЧНОГО ТРАКТОРА ПОСЛЕ ПРОВЕДЕНИЯ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

В статье изучены остаточные напряжения сжатия, возникающие в поверхностном слое зубчатых колес после проведения различной химико-термической обработки (цементация, борирование, боросилицирование). Показано, что напряжения возрастают с увеличением времени и температуры обработки. Остаточные напряжения сжатия обеспечивают повышения износостойкости и усталостной прочности упрочненных сталей.

The article considers residual compression stresses, arising in surface layer of gear wheels after different types of chemical treatment (cementation, borating, boron-siliconizing). It has been shown that the saturation temperature and treatment period being increased, both the gradient of residual stresses and their level increase. The residual compression stresses are proved to provide increased surface wear resistance and fatigue characteristics of steels under study.

**Введение.** 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. Создавались лесные трелевочные машины преимущественно на базе тракторов общего назначения с применением навесных приспособлений для специфических условий работы. Однако более тяжелые условия работы лесных машин по сравнению с сельскохозяйственными приводят к необходимости проведения внеплановых ремонтов и увеличению простоев трелевочного трактора.

Разрушение контактных поверхностей конических зубчатых колес переднего ведущего моста трелевочного трактора ТТР-401 при его эксплуатации, как уже отмечалось, связано с образованием на зубьях пластических деформаций [1]. В связи с этим наиболее эффективным способом повышения эксплуатационного ресурса деталей трансмиссий трелевочного трактора ТТР-401 является применение борирования и боросилицирования. Однако для грамотного определения температурно-временных параметров данных процессов химико-термической обработки (ХТО) необходимо изучение остаточных напряжений в упрочненном слое.

Согласно современным представлениям теории разрушения деталей установлено, что после образования пластических деформаций в локальном объеме образуются микротрещины, развитие которых зависит от величины и знака остаточных напряжений [2, 3]. 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 по-

верхности. С учетом остаточных напряжений сжатия можно оценивать предельные размеры и скорость усталостных трещин, а следовательно, и долговечность всей детали в целом. В работах [3, 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.

**1. Методика экспериментального определения остаточных напряжений в упрочненном слое зубчатых колес трелевочного трактора.** На основании теоретической модели напряженного состояния зубьев деталей конической передачи переднего ведущего моста трелевочного трактора ТТР-401 была получена зависимость остаточных напряжений сжатия по глубине слоя после проведения различной химико-термической обработки деталей (цементация, азотирование, борирование, боросилицирование) [1].

Установлено, что характер распространения остаточных напряжений по глубине слоя практически одинаковый для разных процессов ХТО, а максимальных значений они достигают на поверхности. Установлено, что величина и знак остаточных напряжений в основе металла зависят от термической обработки. Так, при закалке образцов остаточные напряжения в металле 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  $10 \times 10 \times 10$  мм методом рентгеноструктурного анализа на установке фирмы Bruker (рис. 1).



1



2

Рис. 1. Установка для проведения рентгеноструктурного анализа фирмы Bruker: 1 – общий вид; 2 – устройство рентгеновской съемки упрочненного образца

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. Размер 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 немонахроматичность 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.

Таким образом, физическое уширение интерференционной линии на рентгенограмме металла или сплава обусловлено только физическими факторами, т. е. связанными с реальной структурой сплава. Уровень микродеформаций и величину блоков когерентного рассеивания находили с использованием методики [5]. Съемки проводились с использованием излучения  $\text{СоK}_{\alpha}$ ; анализировалось физическое уширение линий (110) и (211).

**2. Результаты определения остаточных напряжений в упрочненном слое зубчатых колес трелевочного трактора.** На рис. 2–5 представлены графики распределения остаточных напряжений сжатия по глубине упрочненных слоев, полученных с использованием изучаемых составов насыщения при различных температурно-временных параметрах процессов ХТО. Из графиков 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.

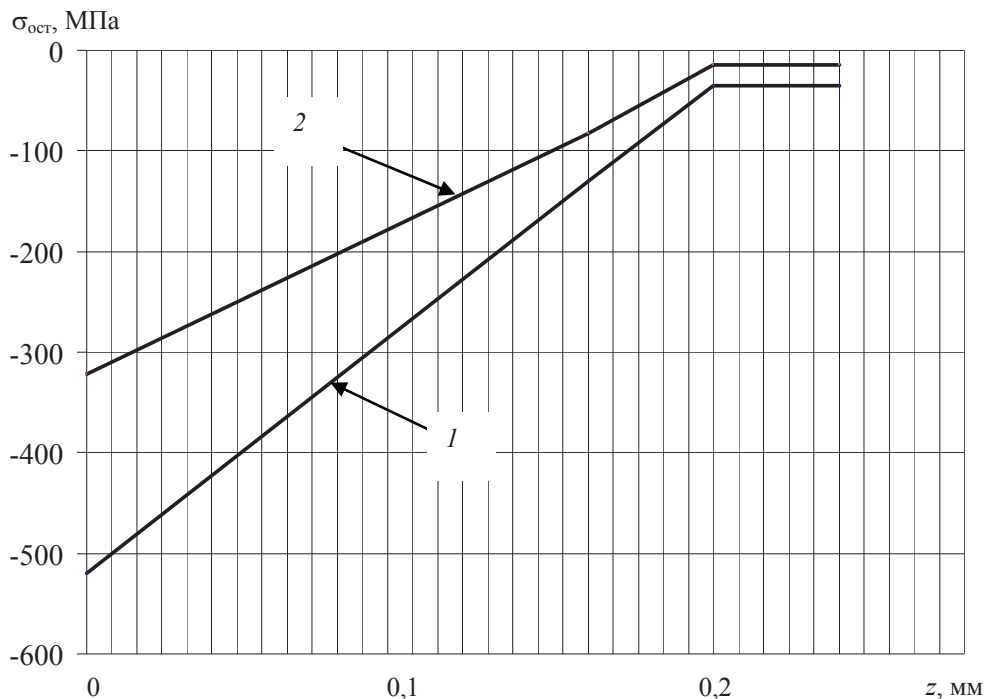


Рис. 2. Изменение расчетных остаточных напряжений сжатия по глубине упрочненного слоя при борировании и боросилицировании:  
1 – борирование; 2 – боросилицирование

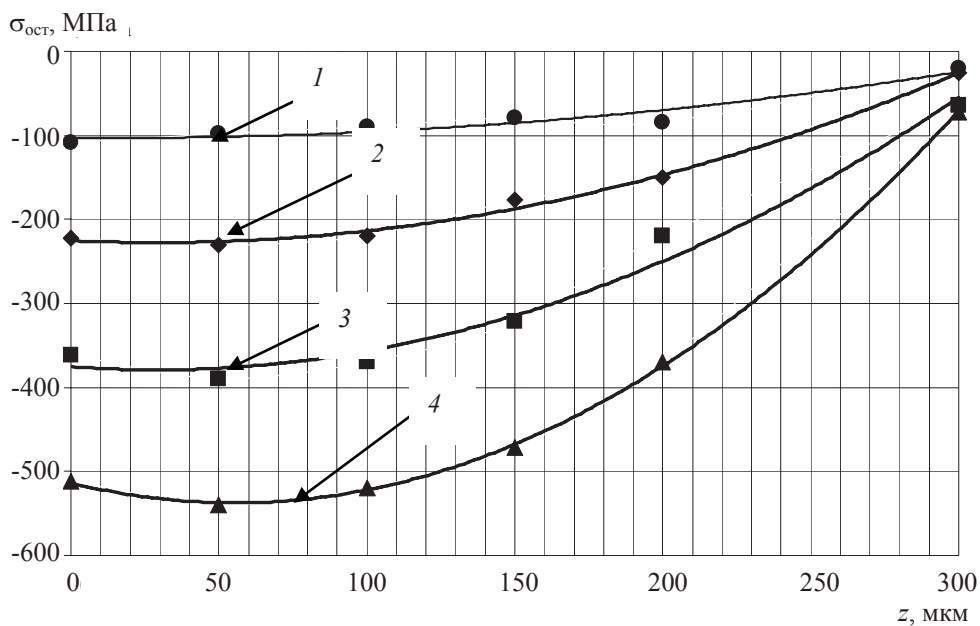


Рис. 3. Распределение остаточных напряжений сжатия по глубине упрочненного слоя образцов стали 25ХГТ:  
1 – цементация; 2 – азотирование; 3 – боросилицирование; 4 – борирование

Наибольших значений остаточные напряжения сжатия достигают при проведении борирования с температурой насыщения 1050°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.

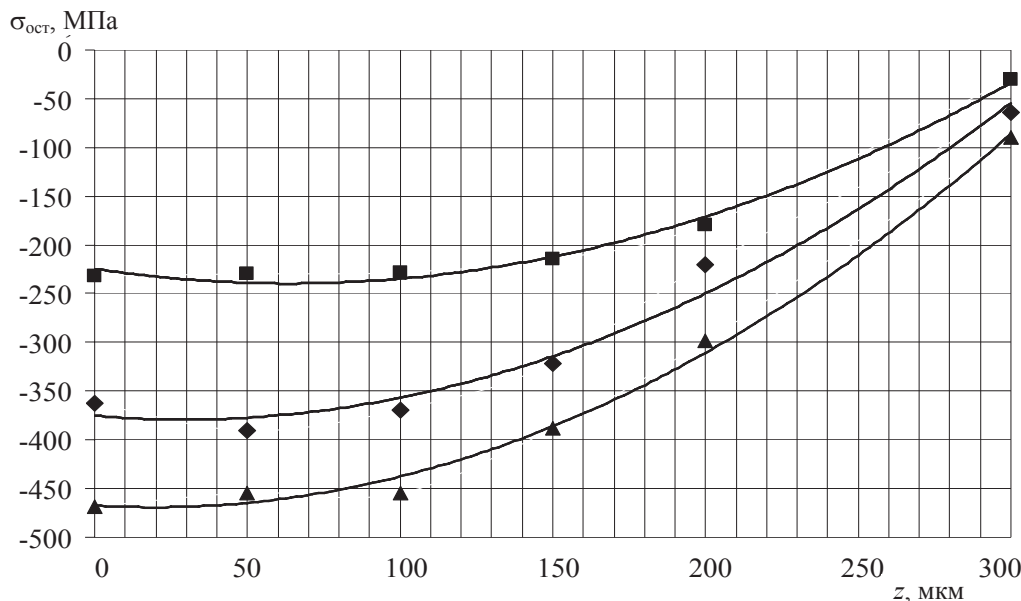


Рис. 4. Распределение остаточных напряжений сжатия по глубине упрочненного боросилицированием слоя образцов стали 25ХГТ: 1 – 890°C; 2 – 950°C; 3 – 1050°C

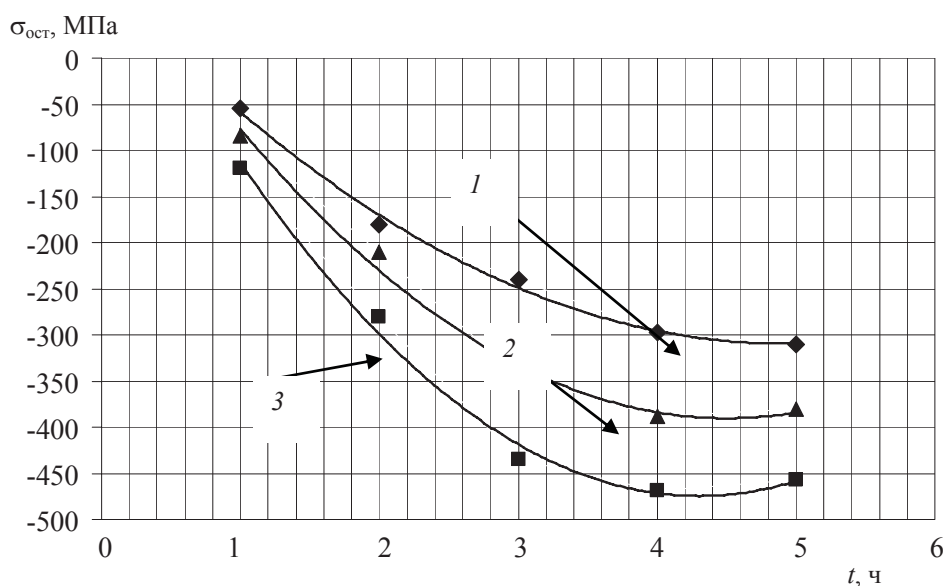


Рис. 5. Изменение остаточных напряжений сжатия образцов стали 25ХГТ при боросилицировании в зависимости от времени обработки при разных температурах насыщения: 1 – 890°C; 2 – 950°C; 3 – 1050°C

При этом с повышением температуры насыщения происходит увеличение уровня остаточных напряжений сжатия как на поверхности, так на глубине 150–200 мкм (рис. 4), 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 [6]. 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.

Полученные экспериментальные значения остаточных напряжений сжатия достаточно хорошо согласуются с теоретическими данными,

что подтверждает корректность расчетов теоретической модели [3].

Остаточные напряжения сжатия зависят не только от микротвердости поверхностного слоя, но и от его толщины. На рис. 6 приведена диаграмма изменения остаточных напряжений сжатия в зависимости от толщины упрочненных борированием и боросилицированием поверхностных слоев. Установлено их повышение при увеличении толщины диффузионного слоя.

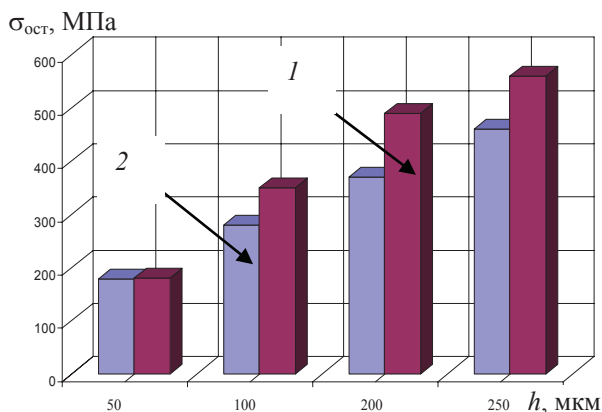


Рис. 6. Изменение остаточных напряжений сжатия  $\sigma_{ост}$  в зависимости от толщины упрочненных слоев при борировании и боросилицировании: 1 – борирование; 2 – боросилицирование

**Выводы.** 1. Учитывая целесообразность сохранения остаточных напряжений сжатия в упрочненном слое на уровне не менее 300–350 МПа, целесообразно применять в качестве упрочнения конических зубчатых передач переднего ведущего моста трелевочных тракторов ТТР-401 процесс боросилицирования, который обеспечивает заданные параметры упрочненного слоя.

2. Установлено, что при микротвердости поверхности 5500 МПа, что соответствует процессу цементации, уровень остаточных напряжений сжатия составляет 95–110 МПа. При увеличении микротвердости поверхности зубьев до 18 000–19 000 МПа (процесс борирования) наблюдается увеличение остаточных напряжений сжатия, уровень которых доходит до 520–545 МПа.

## Литература

1. 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 деревообаб. пром-сть. – 2009. – Вып. XVII. – С. 327–330.
2. Биргер, И. А. Остаточные напряжения / И. А. Биргер. – М.: Машгиз, 1963. – 240 с.
3. Остаточные напряжения при электромагнитной наплавке / П. Н. Ящерицын [и др.] // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2000. – № 2. – С. 62–65.
4. Остаточные напряжения: учеб. пособие / Ж. А. Мрочек [и др.]. – Минск, 2003. – С. 68–72.
5. Горелик, С. С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ / С. С. Горелик. – 2-е изд. – М.: Металлургия, 1970. – 368 с.
6. Ситкевич, М. В. Структура и свойства поверхностных слоев зубчатых передач, упрочненных комплексным борированием / М. В. Ситкевич, М. Н. Пищов, С. Е. Бельский // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки: материалы 10-й Междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 15–18 апреля 2008 г.: в 2 ч. – СПб., 2008. – Ч. 2. – С. 346–353.

Поступила 01.04.2010