



УДК 621.785.532

Поступила 06.07.2015

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

### ANALYSIS OF RESIDUAL STRESSES IN THE HARDENED LAYER GEARS SKIDDERS CHEMICAL SINCE THE PROCESSING

*М. Н. ПИЦОВ, Э. П. АНДРЕЙКОВЕЦ, Белорусский государственный технологический университет,  
г. Минск, Беларусь*

*M. N. PISCHOV, E. P. ANDREYKOVETS, Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus*

*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.*

*The operating conditions of forest machines are analyzed. Transmission parts disabled as a result of intensive wear have been determined, their fracture mechanism has been established. A technique for diffuse impregnation of component parts with powdered mixtures containing boron, aluminum and silicon is offered. An optimal composition and temperature for diffuse impregnation of component parts operating under dynamic loading has been specified. Microhardness of surface and subsurface layers has been studied. Technique for abrasion testing is offered, comparative testing of carburized and borated samples has been carried out.*

**Ключевые слова.** *Остаточные напряжения, трелевочный трактор, передний ведущий мост, зубья, коническая передача, боросилицирование, испытания.*

**Keywords.** *Residual stresses, skidder, front axle, teeth, bevel gear, borosilitsirovanie, test.*

#### **Методика экспериментального определения остаточных напряжений в упрочненном слое зубчатых колес трелевочного трактора**

Разрушение контактных поверхностей конических зубчатых колес переднего ведущего моста трелевочного трактора ТТР-401 при его эксплуатации связано с образованием на зубьях пластических деформаций.

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 [1, 2]. Так, остаточные напряжения растяжения в ходе длительного воздействия на микротрещины вызывают их увеличение до критических значений, при которых резко снижаются 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 [2, 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 толщине поверхностного слоя. Определялся как уровень остаточных напряжений, так и их знак.

На основании теоретической модели напряженного состояния зубьев деталей конической передачи переднего ведущего моста трелевочного трактора ТТР-401 была получена зависимость остаточных на-

пряжений сжатия по толщине слоя после проведения различной химико-термической обработки деталей [3].

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» (рис. 1).

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

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

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:

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

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. Таким образом, физическое уширение интерференционной линии на рентгенограмме металла или сплава обусловлено только физическими факторами, т. е. связанными с реальной структурой сплава. Съемки проводили с помощью излучения  $\text{CoK}_{\alpha}$ ; анализировали физическое уширение линий (110) и (211).

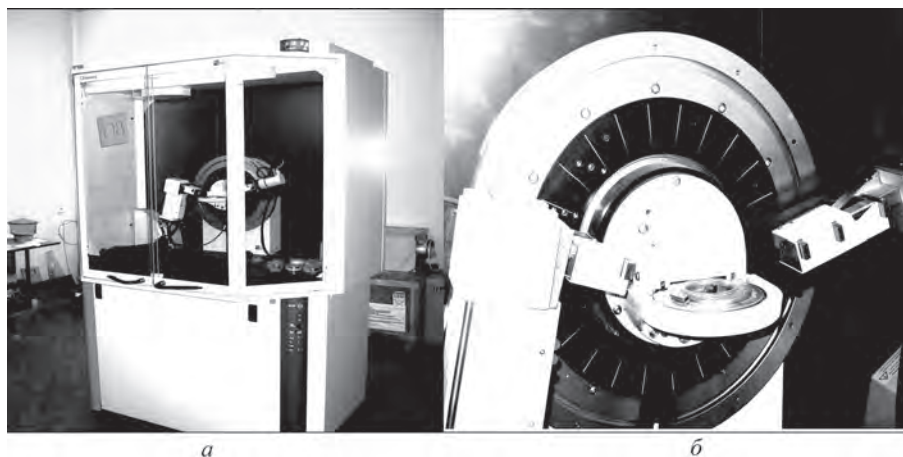


Рис. 1. Установка для проведения рентгеноструктурного анализа фирмы «Bruker»: а – общий вид; б – устройство рентгеновской съемки упрочненного образца

**Результаты определения остаточных напряжений в упрочненном слое зубчатых колес трелевочного трактора**

На рис. 2–5 показано распределение остаточных напряжений сжатия по толщине упрочненных слоев, полученных с использованием изучаемых составов насыщения при различных температурно-временных параметрах процессов ХТО. Из рисунков 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 толщине поверхностного слоя, величина которого зависит от способа ХТО.

Наибольших значений остаточные напряжения сжатия достигают при проведении борирования с температурой насыщения 1050 °С. 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 (рис. 4), что дополнительно повышает прочность и износостойкость упрочненного слоя.

Экспериментальные результаты свидетельствуют о достаточно равномерном распределении остаточных напряжений сжатия по толщине слоя, особенно при упрочнении методом боросилицирования, что хорошо согласуется, как уже отмечалось, с распределением микротвердости и микрохрупкости по толщине 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.

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

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.

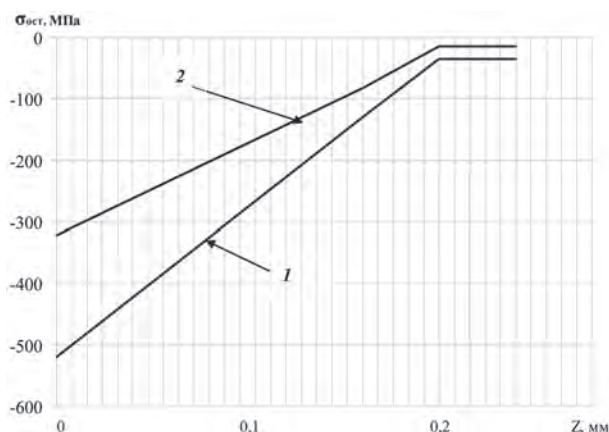


Рис. 2. Изменение остаточных напряжений сжатия по толщине упрочненного слоя при борировании и боросилицировании: 1 – борирование; 2 – боросилицирование

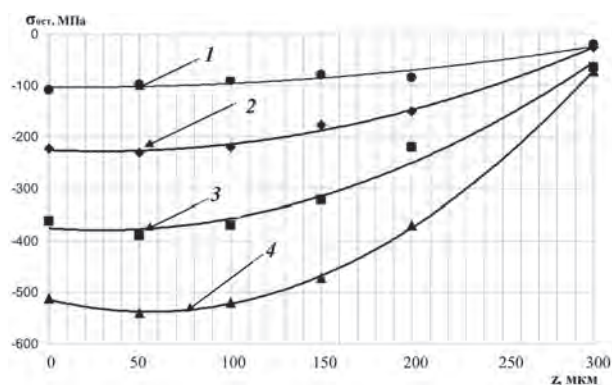


Рис. 3. Распределение остаточных напряжений сжатия по толщине упрочненного слоя образцов стали 25ХГТ: 1 – цементация; 2 – азотирование; 3 – боросилицирование; 4 – борирование

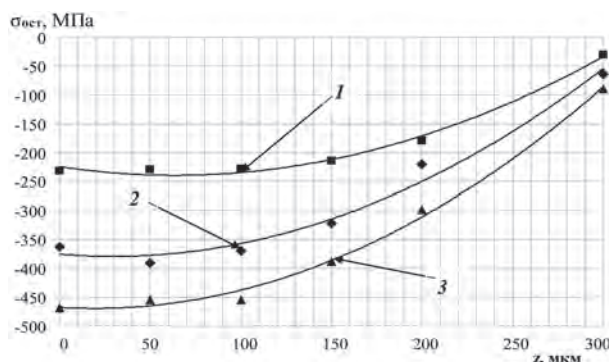


Рис. 4. Распределение остаточных напряжений сжатия по толщине упрочненного боросилицированием слоя образцов стали 25ХГТ: 1 – 890; 2 – 950; 3 – 1050 °С

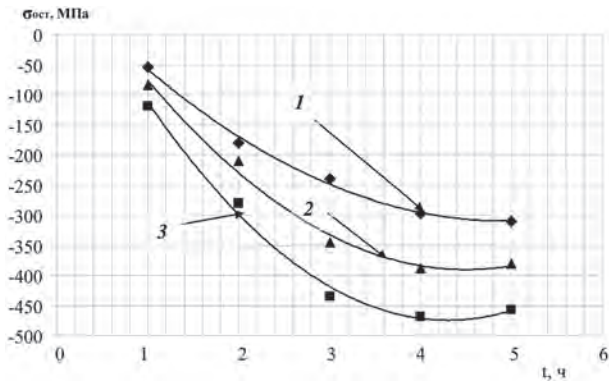


Рис. 5. Изменение остаточных напряжений сжатия образцов стали 25ХГТ при боросилицировании от времени насыщения при разных температурах насыщения: 1 – 890; 2 – 950; 3 – 1050 °С

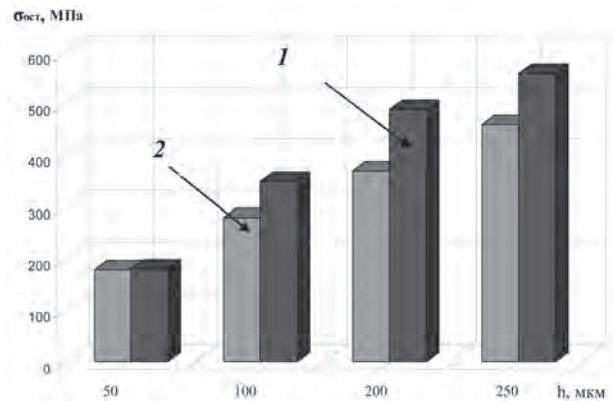


Рис. 6. Изменение остаточных напряжений сжатия  $\sigma_{ост}$  в зависимости от толщины упрочненных слоев при борировании и боросилицировании: 1 – борирование; 2 – боросилицирование

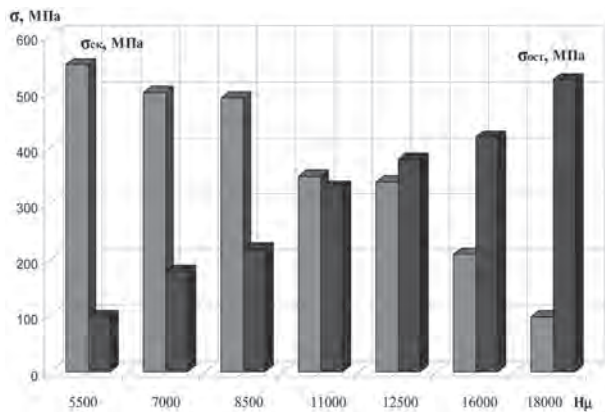


Рис. 7. Изменение остаточных напряжений сжатия  $\sigma_{ост}$  и напряжений скола  $\sigma_{ск}$  в зависимости от микротвердости поверхностного слоя

На рис. 7 показано изменение остаточных напряжений сжатия и напряжений скола в зависимости от микротвердости поверхностного слоя зубьев. Из рисунка видно, что при микротвердости поверхности 5500 МПа уровень напряжений скола достаточно высокий и составляет 550–560 МПа. При этом уровень остаточных напряжений сжатия составляет 95–110 МПа. При увеличении микротвердости поверхности зубьев до 18000–19000 МПа наблюдается увеличение остаточных напряжений сжатия, уровень которых достигает до 520–545 МПа. Также было установлено, что в этом случае напряжения скола резко уменьшаются и составляют 102–108 МПа.

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

### Литература

1. Б и р г е р, И. А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 240 с.
2. Остаточные напряжения при электромагнитной наплавке / П. И. Ящерицын [и др.] // Весті НАН Беларусі. Сер. фіз-тэхн. навук. 2000. № 2. С. 62–65.
3. М а к а р е в и ч, С. С. Модель напряженного состояния зубьев деталей трансмиссий трелевочных тракторов / С. С. Макаревич, М. Н. Пищов, С. Е. Бельский // Тр. БГТУ. Сер. II. Лесная и деревообаб. пром-сть. 2009. Вып. XVII. С. 327–330.
4. М р о ч е к Ж. А. Остаточные напряжения: учеб. пособ. / Ж. А. Мрочек [и др.]. Минск, 2003. С. 68–72.

### References

1. B i r g e r I. A. *Ostatochnye napryazheniya* [Residual stresses]. Moscow, Mashgiz Publ., 1963, 240 p.
2. Ostatochnye napryazheniya pri elektromagnitnoj naplavke [Residual stresses in the electromagnetic surfacing]. *Vesti Natsiyanal'nay akademii navuk Belarusi, seriya fizika-tehnicheskikh navuk – Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, seriya Physical and technical Sciences*, 2000, no. 2, pp. 62–65.
3. M a k a r e v i c h S. S., P i s c h o v M. N., B e l s k i j S. E. Model napryazhennogo sostoyaniya zubev detalej transmissij trelevochnykh traktorov [Model stress state of teeth transmission parts skidders]. *Trudy BGTU. Ser. II. Lesnaya i derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost – Proceedings BSTU. Ser. II, Timber Industry*. 2009, vyp. XVII, pp. 327–330.
4. M r o c h e k Z h. A. *Ostatochnye napryazheniya: ucheb. posobie* [Residual stress: studies. allowance]. Minsk, 2003, pp. 68–72.



**Сведения об авторе**

*Пицов Михаил Николаевич*, канд. техн. наук, Белорусский государственный технологический университет. Минск, Беларусь ул. Свердлова, 13а, тел. +375-29-570-72-76.

**Information about the authors**

*Pischov Mikhail*, Ph. D in Engineering, Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus, Sverdlova str., 13a. Tel. +375-29-570-72-76.

*Поздравляем!*

*КОНСТАНТИНОВА  
Валерия Михайловича*

*кафедра материаловедения  
в машиностроении МТТФ,*

*с присвоением ученого звания профессора*