

УДК 621.002.6:669.14

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ МОЛИБДЕНОМ И НИОБИЕМ НА ПРОКАЛИВАЕМОСТЬ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ ЦЕМЕНТИРУЕМЫХ СТАЛЕЙ 20ХНЗА И 20ХГНМ

**Л. Р. ДУДЕЦКАЯ, А. Н. ГЛУШАКОВ**

*Учреждение образования «Физико-технический  
институт НАН Беларуси», г. Минск*

### **Введение**

Тяжелонагруженные зубчатые колеса трансмиссий являются составной частью силовых передач, применяемых в машиностроении. В процессе эксплуатации эти детали подвергаются сложному силовому воздействию, вызывающему упругое и пластическое деформирование, наклеп, мало- и многоцикловую усталость, изменение химического состава в поверхностном слое. Долговечность стали, из которой изготавливают тяжелонагруженные зубчатые передачи, характеризуется группой критериев, где основными являются механические свойства, а также структура и свойства диффузионных слоев, формирующихся при цементации [1], [2].

Применяемая в настоящее время металлургическими заводами технология выплавки цементлируемых сталей не обеспечивает стабильного получения в изделиях мелкозернистой структуры. В то же время мощности тракторов растут, и для получения деталей, которые смогут выдерживать более высокие нагрузки при сохранении своих габаритных размеров, необходимы новые марки сталей. Поэтому применение цементлируемой стали 20ХНЗА с наследственным зерном крупнее 6-го балла неприемлемо для изготовления нагруженных зубчатых колес.

Основной целью исследований являлась разработка технологии изготовления зубчатых колес трансмиссии тракторов «Беларус» из новой цементлируемой стали с пониженным содержанием никеля как альтернативы серийной стали 20ХНЗА, а также осуществление корректировки режимов деформационной обработки и цементации заготовок с учетом нового компонентного состава стали. Основными потребителями новых сталей со стабильно мелким зерном могут быть такие крупные предприятия, как Минский тракторный, Минский автомобильный, Белорусский автомобильный заводы и другие машиностроительные предприятия Беларуси и СНГ, выпускающие автотракторную и уборочную технику.

Существуют два основных подхода к созданию высокопрочных сталей для тяжелонагруженных зубчатых колес (ТЗК). Один из них заключается в повышении комплекса свойств существующих марок сталей за счет реализации оптимальной схемы легирования, другой – в применении таких технологических приемов, как вакуумный и электрошлаковый переплав (ЭШП), модифицирование, использование чистой исходной шихты, которые способствуют созданию мелкозернистой исходной структуры заготовок.

Ранее сотрудниками Физико-технического института и Объединенного института машиностроения (ОИМ) НАН Беларуси при участии специалистов Минского тракторного завода было исследовано влияние дополнительного легирования серийной стали 20ХНЗА малыми добавками молибдена (0,15 %) и ниобия (0,04 %) на механические свойства, а также на структуру и свойства цементированного слоя зубчатых колес.

На основании полученных результатов была разработана цементируемая сталь 20ХНЗМБ [3] с хорошей технологической пластичностью и наследственно мелким аустенитным зерном, обеспечивающим малое коробление зубчатых колес при цементации.

### Методики проведения исследований

На первом этапе исследований производили выплавку стали на РУП «Минский тракторный завод» в лабораторной индукционной печи ИО-102 емкостью 0,15 т с последующим электрошлаковым переплавом на экспериментальной установке Института технологии металлов НАН Беларуси. Из полученных слитков методом свободной ковки получали прутки диаметром 12 мм для изготовления опытных образцов и проведения механических испытаний и прутки диаметром 35 мм для исследования прокаливаемости. С использованием прессования в закрытых матрицах были получены поковки для изготовления зубчатых колес и натуральных образцов. Механические испытания на растяжение и ударную вязкость были проведены в центральной лаборатории Минского тракторного завода по ГОСТ 1497–84 [4], ГОСТ 9454–78 [5].

Исследование микроструктуры цементированных слоев натуральных образцов зубчатых колес проводили с использованием травителя на основе водного раствора пикриновой кислоты. Качество микроструктуры натуральных образцов оценивали с учетом технических требований заводских чертежей, ГОСТ 5639–82 [6] ГОСТ 8233–56 [7] и стандартов, разработанных в Объединенном институте машиностроения. В соответствии с этими требованиями осуществляли дополнительный контроль следующих показателей:

- наличие в цементированном слое наряду с мартенситом бейнита и карбидов;
- эффективная толщина цементированного слоя до микротвердости 750 HV<sub>0,2</sub>, 700 HV<sub>0,2</sub>, 600 HV<sub>0,2</sub>.

Прокаливаемость опытной стали исследовали по методике ОИМ и ГОСТ 5657–69 [8].

### Результаты исследований

На первом этапе исследовали сталь 20ХНЗА, легированную небольшими добавками молибдена и ниобия с целью увеличения прокаливаемости и обеспечения наследственно мелкого зерна в процессе ее термической и деформационной обработки.

Компонентный состав и показатели механических свойств серийной и опытной сталей приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Компонентный состав опытной и серийной стали

Сталь	Компонентный состав, мас. %						
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb
20ХНЗА ГОСТ 4543–71	0,17–0,24	0,17–0,37	0,3–0,6	0,6–0,9	2,75–3,15	–	–
20ХНЗМБ	0,20	0,23	0,42	0,70	3,06	0,15	0,014

Таблица 2

Механические свойства

Сталь	Механические свойства					Термообработка
	$\sigma_{в}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	
20ХНЗА ГОСТ4543–71	930	735	12	55,0	1080	Закалка 860 °С, масло, отпуск 200 °С (2 ч), воздух
20ХНЗМБ	1420	1280	14	59,0	690	

Качество цементации образцов опытной стали 20ХНЗМБ соответствовало следующим показателям:

- твердость на поверхности зуба, 59–61 HRC;
- твердость сердцевины зуба, 42–43 HRC;
- толщина цементированного слоя, 1,4 мм

Микроструктура опытных сталей после закалки и отпуска представляла собой мелкоигльчатый малоуглеродистый мартенсит. Балл зерна аустенита соответствовал № 8 по ГОСТ 5639–82 [6].

Для новой стали характерным является повышение предела прочности и предела текучести по сравнению с серийной сталью 20ХНЗА, что можно объяснить формированием мелкозернистой структуры и упрочнением твердого раствора под влиянием ниобия и молибдена.

Микроструктура цементированного слоя содержала:

- мелкоигльчатый мартенсит 1 балла по ГОСТ 8233–56 [7];
- троостит по баллу 1;
- аустенит остаточный по баллу 2;
- балл зерна – 7–8.

Микроструктура сердцевины зуба – малоуглеродистый мартенсит.

В табл. 3 приведены результаты определения эффективной толщины цементированного слоя для исследуемых образцов. Распределение микротвердости по глубине цементированного слоя натуральных образцов приведено на рис. 1.

Таблица 3

Эффективная толщина цементированного слоя натуральных образцов

Микротвердость, МПа	Эффективная толщина цементированного слоя натуральных образцов, мм			
	Требование СТП ОИМ	Сталь 20ХНЗА	Сталь 20ХНЗМБ ЭШП, после деформационной обработки	Сталь 20ХНЗМБ ЭШП (литая)
750 HV <sub>0,2</sub>	0,35	отсутствует	0,50 обеспечена	0,45 обеспечена
700 HV <sub>0,2</sub>	0,55	0,60 обеспечена	0,75 обеспечена	1,1 обеспечена
600 HV <sub>0,2</sub>	0,90	1,25 обеспечена	1,35 обеспечена	1,60 обеспечена

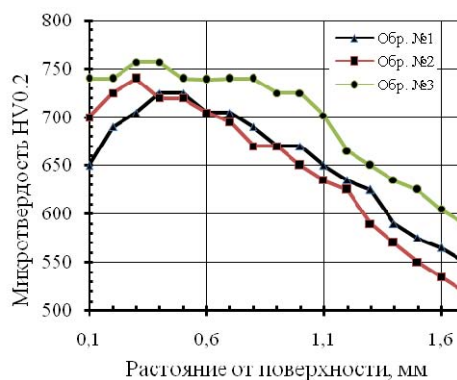


Рис. 1. Распределение микротвердости по глубине цементированного слоя опытной партии натуральных образцов зубчатых колес: 1 – серийная сталь 20ХНЗА; 2 – сталь 20ХНЗМБ ЭШП после деформационной обработки; 3 – сталь 20ХНЗМБ ЭШП в литом состоянии

Микроструктура цементированного слоя (рис. 2) представляет собой игольчатый мартенсит в зерне 5–6 баллов для образца серийной стали 20ХН3А, 7–8 баллов для образца опытной стали 20ХН3МБ после ЭШП и ковки. Твердость сердцевины образцов составляет 42–43 НРС, что соответствует требованиям чертежа. Присутствие избыточных карбидов и бейнита во всех образцах не установлено.

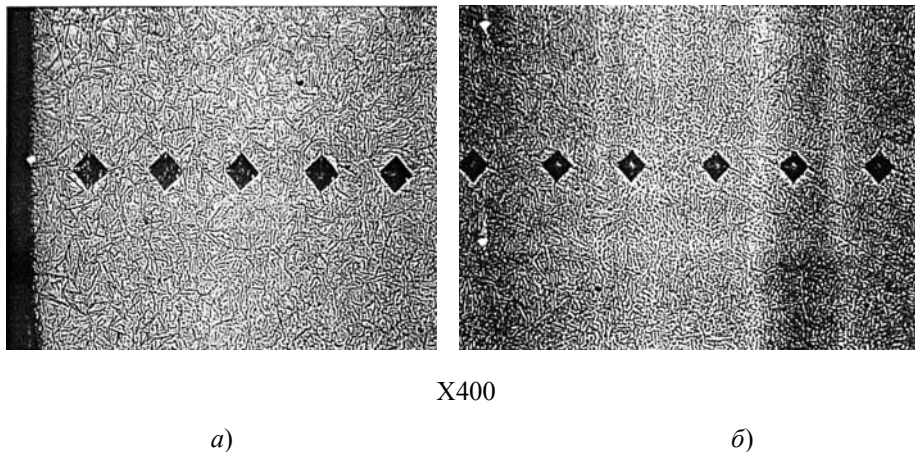


Рис. 2. Микроструктура цементированного слоя зубчатых колес 112-1701351 КПП трактора «Беларус», изготовленных из серийной стали 20ХН3А (а) и стали 20ХН3МБ после ЭШП и ковки (б). Расстояние от поверхности зуба: 0,25–0,55 мм

Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы: легирование стали 20ХН3А небольшими добавками молибдена и ниобия позволяет получить образцы с устойчивой мелкозернистой структурой и повышенной прочностью сердцевины (в том числе с повышенными значениями предела текучести).

Несмотря на выявленные преимущества новой стали, она имеет существенный недостаток – более высокую стоимость проката, что сдерживает ее использование в массовом производстве при изготовлении зубчатых колес.

На основании дальнейшего поиска конструкционных цементуемых сталей, пригодных для получения стабильно мелкого зерна, в качестве базовой при проведении дальнейших исследований была выбрана сталь 20ХГНМ, успешно применяемая ведущими зарубежными фирмами в авто- и тракторостроении при изготовлении зубчатых колес трансмиссий. Для обеспечения мелкозернистой структуры и повышения физико-механических свойств применили дополнительное легирование стали ниобием.

Выплавку стали производили в индукционной печи с последующим электрошлаковым переплавом. Характерной особенностью стали, подвергнутой электрошлаковому переплаву, является низкое содержание серы и неметаллических включений, что должно положительно отразиться на ее механических свойствах. Данные по химическому составу и механическим свойствам представлены в табл. 4, 5.

Таблица 4

**Изменение химического состава опытной стали 20ХГНМБ при электрошлаковом переплаве**

Условия изготовления стали	Массовая доля элементов, %								
	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	Nb
Индукционная плавка	0,24	0,32	0,46	0,65	0,01	0,022	0,56	0,24	0,045
Электрошлаковый переплав	0,22	0,26	0,44	0,65	0,005	0,018	0,55	0,24	0,043

Таблица 5

Механические свойства серийной и опытной сталей при  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Сталь	$\sigma_b$	$\sigma_T$	$\delta$	$\Psi$	KCU	Термическая обработка
	МПа	МПа	%	%	кДж/м <sup>2</sup>	
20ХГНМ ГОСТ 4543-71	1180-1570	930	7	–	590	Закалка 860 °С, масло, отпуск 150-180 °С, воздух
20ХГНМБ Опытная	1450	1316	8	52	1340	Закалка 880 °С, масло, отпуск 200 °С, воздух

На рис. 3 приведены результаты сравнения прокаливаемости образцов опытной стали 20ХГНМБ, серийных сталей 20ХНЗА и 20ХГНМ. Из рис. 3 видно, что опытная сталь 20ХГНМБ обладает повышенной прокаливаемостью по сравнению с серийными сталями 20ХНЗА и 20ХГНМ.

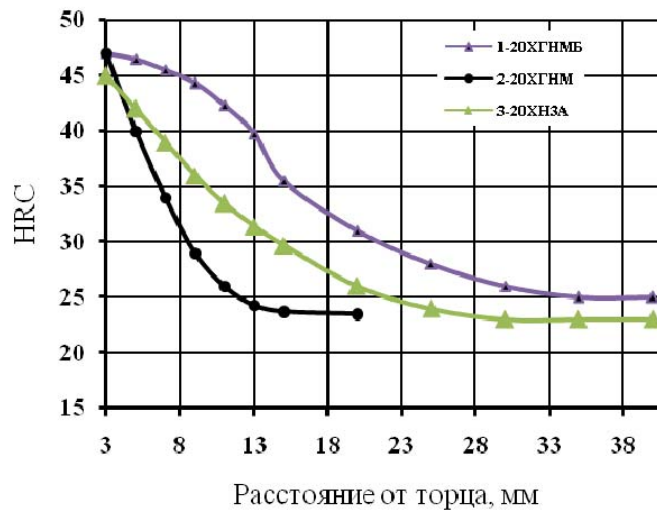


Рис. 3. Прокаливаемость сталей 20ХГНМБ, 20ХГНМ и 20ХНЗА

Химико-термическую обработку образцов и зубчатых колес выполняли на линии камерных агрегатов «Ипсен» по следующей технологической схеме: цементация при 930 °С 8 ч, подстуживание до 860 °С с выдержкой в течение 1,5 ч, закалка в масло МС-20, двойной низкий отпуск при 170 °С в течение 2 ч.

Балл зерна в цементированном слое составил 10-11, в сердцевине – 9-10 (рис. 4). Твердость цементуемого слоя составила 63 HRC, сердцевины – 40 HRC.

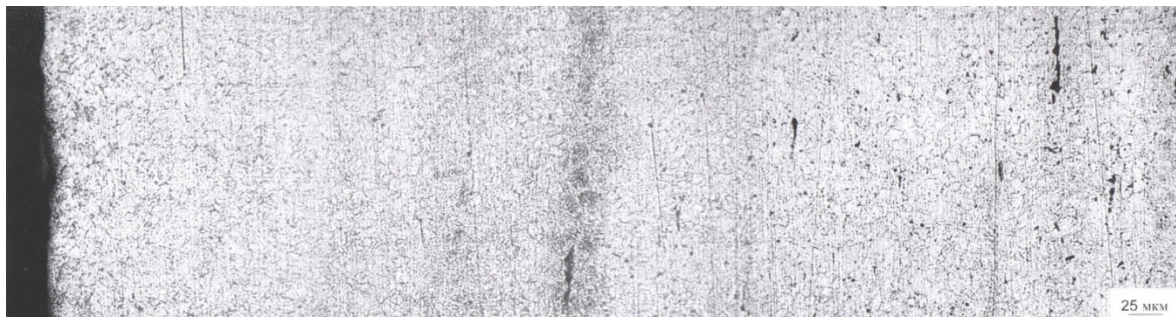


Рис. 4. Микроструктура цементированного слоя образца из стали 20ХГНМБ (индукционная плавка) (X400)

В настоящее время на Минском тракторном заводе изготовлена опытная партия зубчатых колес коробки передач трактора «Беларус», которая подлежит испытаниям в полевых условиях. Достигнута договоренность с Волгоградским заводом «Красный октябрь» на выплавку опытно-промышленной плавки стали 20ХГНМБ в объеме 20 т.

#### **Заключение**

В процессе исследований установлено, что легирование стали 20ХГНМ микро-добавками ниобия приводит к получению мелкозернистой структуры, устойчивой к росту при термической и деформационной обработке. После цементации и закалки размер зерна цементированного слоя зубчатых колес соответствовал 10–11 баллам. Результаты исследования структуры и свойств новой стали, формирующихся в процессе цементации и последующей термической обработки, а также расчеты ресурса зубчатых колес редукторной части коробки передач трактора «Беларус», выполненные в ОИМ НАН Беларуси, свидетельствуют о работоспособности новой стали в объеме, эквивалентном 10–12 тыс. ч работы коробки передач. Из данной стали были изготовлены шесть наименований нагруженных зубчатых колес коробки передач трактора «Беларус-1221», которые в настоящее время проходят подконтрольную эксплуатацию.

#### **Литература**

1. Калашников, А. С. Технология изготовления зубчатых колес / А. С. Калашников. – М. : Машиностроение, 2004. – С. 123–155.
2. Руденко, С. П. Исследование сопротивления контактной усталости поверхностно упрочненных зубчатых колес / С. П. Руденко // Изв. НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2009. – № 4. – С. 48–53.
3. Сталь : пат. № 15402 Респ. Беларусь, МПК7 С 22 С 38/44 / Л. Р. Дудецкая, И. В. Емельянович ; заявитель Гос. науч. учреждение «Физ.-техн. ин-т Нац. акад. наук Беларуси».
4. ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение.
5. ГОСТ 9454–78. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах.
6. ГОСТ 5639–82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна.
7. ГОСТ 8233–56. Сталь. Эталоны микроструктуры.
8. ГОСТ 5657–69. Сталь. Метод испытания на прокаливаемость.

*Получено 20.10.2012 г.*