

І СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ. ОПІР РУЙНУВАННЮ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

УДК 621.81.00.67:621.785.5

Д-р техн. наук Чейлях А. П.¹, Були С. А.², Мак-Мак Н. Е.¹, Звонарева М. И.²,
канд. техн. наук Чейлях Я. А.¹, канд. техн. наук Рябикина М. А.¹

¹ Приазовский государственный технический университет,
² ООО «МАГМА»; г. Мариуполь

АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЯ, МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ШЕСТЕРЕН РАЗНЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ

Цель работы. Изучение причин, характера разрушения, структурных, механических и эксплуатационных характеристик тяжелоагрессивных цементованных шестерен из стали 20Х2Н4А различных фирм-производителей для совершенствования технологии их производства и повышения работоспособности.

Для исследования причин разрушения были отобраны отработанные шестерни производства фирмы *Joy Global Inc.* («Joy») (США), ООО «МАГМА» и Ясиноватского машиностроительного завода («ЯМЗ») (Украина) тяжелоагрессивных редукторов горнопроходческих комбайнов, полностью вышедшие из строя, изготовленные из стали 20Х2Н4А после цементации и полного цикла термической обработки.

Методы исследования. Макроскопический (ГОСТ 10243-75) и микроскопический анализы, спектрографический и квантометрический анализ химического состава по глубине цементованного слоя, измерение твердости по Роквеллу (HRC), микротвердости по глубине слоя (ГОСТ 9450-76), испытания механических свойств на растяжение ГОСТ 1497-84, испытания износостойкости трением скольжения металл-металл.

Исследованы: характер разрушения, макроструктура, микроструктура шестерен, распределение углерода и микротвердость по глубине цементованного слоя. Проведены сравнительные испытания на изнашивание в условиях сухого трения скольжения.

Полученные результаты. Установлено, что причинами выкрашивания активных поверхностей зубьев тяжелоагрессивных шестерен горных машин явилась недостаточная прочность цементованного слоя на определенной глубине, а также экстремальные перегрузки элементов зацепления при эксплуатации. Распределение углерода по глубине цементованного слоя шестерен производства «МАГМА» в 1,5 раза превосходит таковое для деталей производства «Joy», что не исключает насыщение последних углеродом и азотом проведением нитроцементации. Микроструктура упрочненных слоев в шестернях производителей «Joy» и «МАГМА» состоит из мелкодисперсного мартенсита, карбидов и остаточного аустенита, соотношение этих фаз изменяется по глубине слоя согласно уменьшению содержания углерода. Механические свойства образцов стали 20Х2Н4А, вырезанных из шестерен указанных производителей, соответствуют требованиям ГОСТ 4353-71. Микроструктура шестерен производства «ЯМЗ» троосто-мартенситная при более крупном зерне (номер 4–5), что обусловило получение несколько меньшей твердости и относительной износостойкости. Наибольшей износостойкостью обладают образцы, вырезанные из шестерен производства «Joy» и «МАГМА», несколько меньшей – «ЯМЗ».

Научная новизна. На основе анализа повреждаемости определены причины выхода из строя шестерни тяжелоагрессивных зубчатых передач, работающих в сложных условиях эксплуатации разных производителей, проведены их сравнительные исследования и испытания свойств. Установлен характер изменения микроструктуры, распределения микротвердости в зависимости от концентрации углерода по толщине цементованного слоя шестерен.

Практическая ценность. Результаты исследований послужили научнообоснованными рекомендациями для совершенствования технологического процесса производства и упрочнения тяжелоагрессивных шестерен в условиях ООО «МАГМА» для повышения их эксплуатационных характеристик.

Ключевые слова: цементованный слой, мартенсит, остаточный метастабильный аустенит, карбиды, микроструктура, свойства, износостойкость.

Введение

Ответственными деталями горнодобывающих и строительных машин являются шестерни редукторов, которые при эксплуатации подвергаются интенсивному изнашиванию, контактно-усталостным и ударным нагрузкам, коррозионному разрушению [1–3]. Поломки и преждевременный выход из строя элементов зубчатых передач обуславливают значительные экономические затраты. Проведение ремонтных работ деталей горных машин осложняется необходимостью их извлечения из шахт и карьеров. Проблема надежности работы зубчатых передач связана с технологией их изготовления [4]. В машиностроении стандартной технологией упрочнения элементов зубчатых передач является цементация, предварительная и окончательная термическая обработка. Поэтому задача повышения качества упрочнения указанных деталей, надежности и долговечности работы оборудования является весьма актуальной, что связано с необходимостью совершенствования технологий обработок и поверхностного упрочнения.

Материал и методики исследований

Для исследования причин разрушения были отобраны отработанные шестерни и зубчатые колеса производства фирмы Joy Global Inc. («Joy») (США), ООО «МАГМА» и Ясиноватского машиностроительного завода («ЯМЗ»)¹ (Украина) тяжело нагруженных редукторов горнопроходческих комбайнов, полностью вышедшие из строя. Материалом исследования являлась сталь 20X2H4A (в масс. %: 0,17 С; 0,25 Si; 0,39 Mn; 1,33 Cr; 3,12 Ni; 0,022 W; 0,07 Mo; 0,01 Ti; 0,25 Cu; 0,016 S; 0,01 P). Компания «Joy» использует стали AISI 3316, близкие по химическому составу стали 20X2H4A.

Все отработанные шестерни подвергались внешнему осмотру, определялся химический состав стали. Макроструктуру шестерен изучали после шлифовки и травления 20% водным раствором азотной кислоты (HNO₃) невооруженным глазом или с помощью лупы при увеличении Ч10 (ГОСТ10243-75). Изучение и фотографирование микроструктуры проводили на микроскопе «ММТ-14Ц» при увеличениях Ч100 (для определения глубины слоя и номера зерна) и Ч800 (для изучения микроструктуры цементованного слоя). Глубину последнего определяли следующими способами: по макроструктуре, микроструктуре и изменению микротвердости по сечению. Послойный химический анализ проводился на спектрометре Аргон-5СФ и на вакуумном квантометре «Spectrovac-1000» последовательной шлифовкой от поверхности цементованных образцов по направлению к сердцевине с шагом 0,2 мм.

Твердость определялась на приборе Роквелла с нагрузкой 1500 Н (HRC) и 600 Н (HRA) по ГОСТ 9013-59. Микротвердость измерялась на приборе NOVOTEST-МКВ1 по ГОСТ 9450-76.

¹ Далее в статье производители обозначены сокращенно: «Joy», «МАГМА» и «ЯМЗ»

Испытания на изнашивание проводились на машине МИ-1М по схеме испытуемый образец – ролик (контрольное тело) (рис. 1). Размеры образцов – 10×10×25 мм, время изнашивания между двумя взвешиваниями – 3 мин, общее время испытаний – 24 мин. Твердость стального закаленного ролика – 57 HRC, скорость вращения – 500 мин⁻¹ (линейная скорость в зоне трения составляет 1,31 м/с). В процессе изнашивания определялись потери массы образцов. Образцы взвешивались до и после испытания с погрешностью ± 0,0001 в соответствии с ГОСТ – 2764-88. Перед взвешиванием образцы тщательно протирались спиртом. Относительную износостойкость определяли по следующей формуле:

$$E = \frac{\Delta m_{\text{э}}}{\Delta m_{\text{обр}}}, \quad (1)$$

где $\Delta m_{\text{э}}$, $\Delta m_{\text{обр}}$ – потери массы эталона и образца за одинаковое время изнашивания (24 мин). По результатам испытания строилась кривая изнашивания в координатах потеря массы – время изнашивания. В качестве эталона использовалась сталь 45 в отожженном состоянии с твердостью 160–180 НВ.

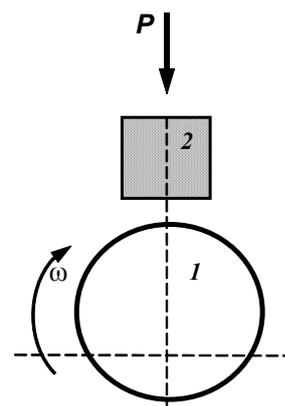


Рис. 1. Схема испытаний образцов при трении скольжении на машине МИ1-М:

1 – контрольное тело (ролик), 2 – образец

Результаты исследования и анализ полученных результатов

При внешнем осмотре отработанных и разрушенных шестерен на торцевой поверхности зубьев обнаружены ямки выкрашивания (рис. 2). Внешний вид излома зубьев не имеет усталостного рельефа, что свидетельствует об одномоментном акте разрушения. Известно [5], что основными видами разрушений зубьев цементованных шестерен являются усталостное разрушение зуба при изгибе, окислительный износ контактирующих поверхностей, деформация и выработка зубьев. Во всех случаях разрушение носит постепенный характер. Поверхность разрушения зубьев исследованных шестерен существенно отличается от рассмотренных видов наличием грубых «вырывов» кусоч-

ков металла зубьев. Трещин и сколов вокруг мест разрушения не наблюдается. Причиной таких повреждений тяжело нагруженных зубчатых передач могут быть значительные радиально-осевые смещения и перекосы шестерен во время работы редуктора [5]. При этом в наименьшей степени разрушению подвержены детали производства «Юу» и в большей степени – шестерни украинских производителей. Это может быть объяснено современным уровнем и культурой технологии производства известной фирмы «Юу», высокой точностью и качеством.

Исследование макроструктуры показало, что в поперечных макрошлифах шестерен всех производителей отсутствуют усадочная раковина и рыхлость, пузыри, трещины, шлаковые включения, флокены, что соответствует требованиям п. 2.17 ГОСТ 4543-71. На рис. 3 представлены фотографии макроструктуры зубьев шестерен, стрелками указаны направления изучения микроструктуры и измерения микротвердости. Видно, что на поверхности зуба шестерни производства «Юу» упрочненный слой сохранен, а в зубьях шестерен «ЯМЗ» он практически отсутствует.



Рис. 2. Оработанные и сильно поврежденные фрагменты зубьев шестерен $\times 1/2$

Изменение концентрации углерода по глубине цементованного слоя образцов, вырезанных из нерабочей части шестерен производства «МАГМА» и «Юу», приведено на рис. 4.

После цементации в условиях «МАГМА» концентрация углерода на поверхности нерабочей части деталей достигает 1,35 % и плавно снижается до 0,52 % на глубине 1,4 мм. Содержание углерода в науглероженном слое шестерен производства «Юу» существенно ниже: 0,6 % С на поверхности и 0,3 % С на глубине 1,4 мм. Это можно объяснить механической обработкой (шлифованием) цементованных поверхностей шестерен либо применением нитроцементации, при которой насыщение поверхности производится одновременно азотом и углеродом. Следует заметить, что при использовании цементации оптимальная концентрация углерода на поверхности зубьев согласно [6] должна составлять в среднем 0,8–1,1 %, а для зубчатых колес, работающих при высоких контактных нагрузках и подвергающихся значительному износу, содержание углерода целесообразно повысить до 1,1–1,4 %.

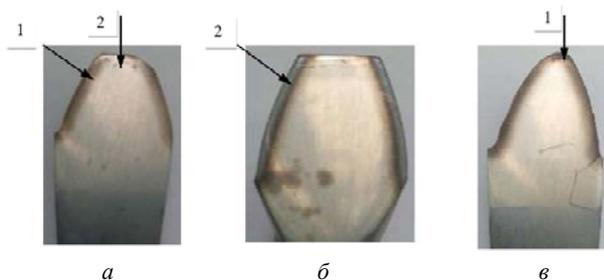


Рис. 3. Макроструктура зубьев (поперечное сечение) и схема измерения микротвердости отработанных зубьев цементованных шестерен производства: а – «ЯМЗ», б – «МАГМА», в – «Юу»

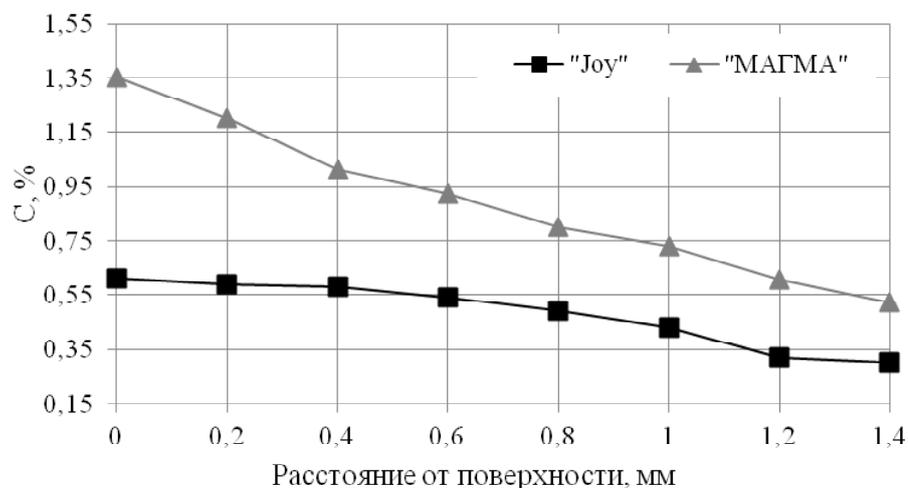


Рис. 4. Изменение содержания углерода по глубине цементованного слоя образцов, вырезанных из нерабочей части шестерен производства «МАГМА» и «Юу»

Анализ химического состава исследованных деталей различных производителей, приведенных в таблице 1, показал следующее. Состав материала шестерен «Юу» по содержанию основных легирующих элементов – хрома, никеля, марганца, кремния, меди, а также сопутствующих элементов и примесей (Mo, V, Ti) в целом соответствует марке цементованной стали 12Х2Н4А. Материал производителей «МАГМА» и «ЯМЗ» по химическому составу отвечает требованиям ГОСТ4543-71 для марок стали 20Х2Н4А и 12Х12Н4А, соответственно.

Содержание углерода на поверхности цементованных деталей «Юу» и «ЯМЗ» составляет 0,63–0,64 % и несколько выше – 0,82 % (местами до 0,97 %) у деталей производства «МАГМА» после шлифовки. Это значительно ниже, чем достигается при цементации (1,2–1,35 %), что объясняется механической обработкой (шлифованием) исследованных поверхностей.

Микроструктура образцов, вырезанных из шестерен производства «ЯМЗ» в направлениях перпендикулярно вершине зуба (1) и поверхности изнашивания (2) (см. рис. 3а), представляет собой троосто-мартенситную (Т+М) смесь, карбиды (К) и остаточный аустенит ($A_{ост}$) (рис. 5). Микротвердость изменяется от 623 HV на поверхности до 523 HV на глубине 1,4 мм в направлении (2) и от 404 до 346 HV на глубине 2,7 мм в направлении (1). Следует отметить, что в процессе эксплуатации цементованный слой в направлении, перпендикулярном поверхности вершины зуба шестерни, стал заметно тоньше, что видно на рис. 3а.

На поверхности зубьев отработанных шестерен производства «МАГМА» и «Юу» наблюдается микроструктура, которая представляет собой мелкодисперсный мартенсит, карбиды и небольшое количество остаточного аустенита, градиентно изменяющаяся от поверхности к сердцевине (рис. 6–7). На фотографиях микроструктуры указаны соответствующие глубина слоя (мм) и микротвердость (МПа). Авторы [7, 8] считают, что присутствие в поверхностных слоях остаточного аустенита в количестве 30–50 % повышает ударную вязкость и трещиностойкость зубчатых передач.

В шестернях производства «ЯМЗ» в направлении (1) (перпендикулярно торцевой поверхности зуба) уп-

роченный слой практически полностью отсутствует, а микротвердость на глубине 0,2 мм составила всего 404 HV. Микротвердость шестерни производства «Юу» в этом же направлении на глубине 0,1 мм составила 720 HV, а на глубине 0,2 мм – 655 HV (рис. 7).

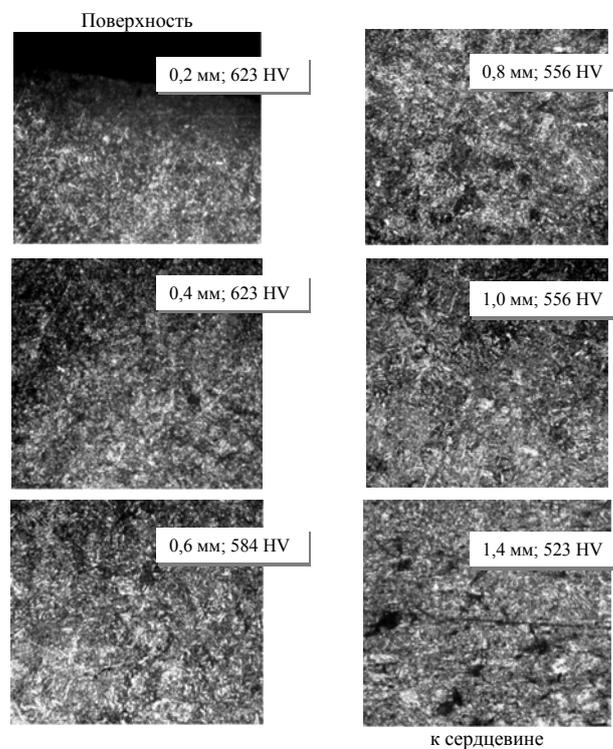


Рис. 5. Панорама микроструктуры и изменения микротвердости от поверхности по глубине цементованного слоя зуба шестерни («ЯМЗ») после эксплуатации в направлении (2) (см. рис. 3а)

В направлении (2) (перпендикулярно рабочей поверхности зуба) на глубине 0,2 мм микротвердость шестерен производства «ЯМЗ» и «Магма» примерно одинакова и равна ~620 HV (рис. 5, 6).

В таблице 2 представлены результаты количественной оценки глубины цементованного слоя и номера зерна микроструктуры

Таблица 1 – Химический состав материала цементованных деталей различных производителей

Производитель	Место определения	Содержание элементов, масс. %								
		C	Cr	Ni	Mn	Si	Cu	Mo	V	Ti
«МАГМА» (зуб шестерни)	Основной металл	0,18	1,32	3,29	0,38	0,29	0,21	0,12	0,006	0,017
	Поверхность	0,82	1,32	3,24	0,39	0,29	0,21	0,12	0,0025	0,017
«Юу»	Основной металл	0,10	1,65	3,37	0,47	0,27	0,08	0,07	0,047	0,001
	Поверхность	0,64	1,65	3,37	0,47	0,27	0,08	0,07	0,047	0,001
«ЯМЗ»	Основной металл	0,13	1,58	3,48	0,57	0,25	0,25	0,36	0,004	0,0015
	Поверхность	0,63	1,58	3,48	0,57	0,25	0,25	0,36	0,004	0,0015

Примечание: содержание серы $\leq 0,018$ %; фосфора $\leq 0,013$ %.

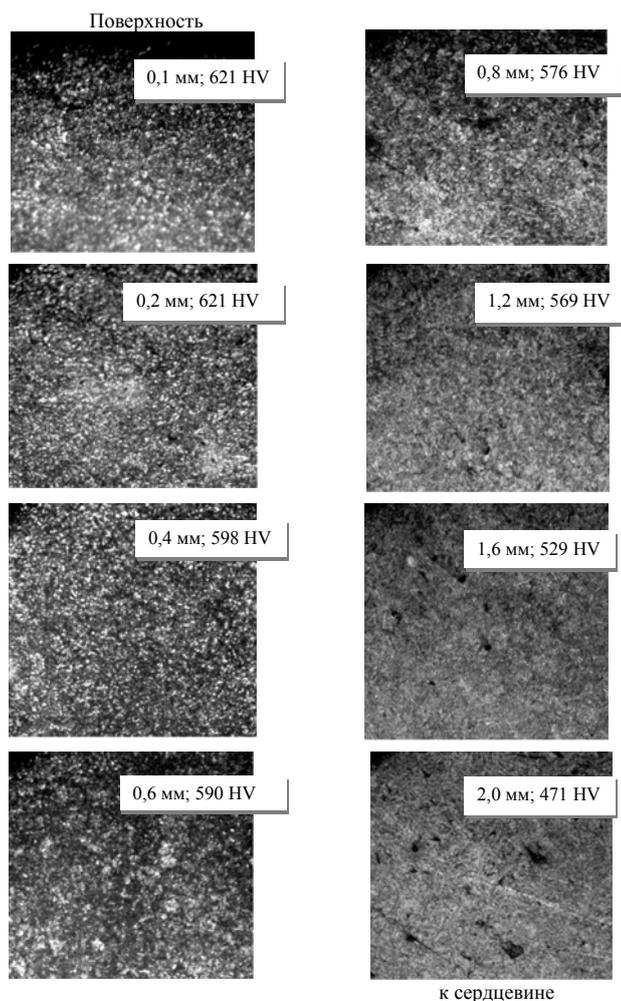


Рис. 6. Панорама микроструктуры и изменение микротвердости от поверхности по глубине цементованного слоя зуба шестерни «МАГМА» в направлении (2) (см. рис. 3б)

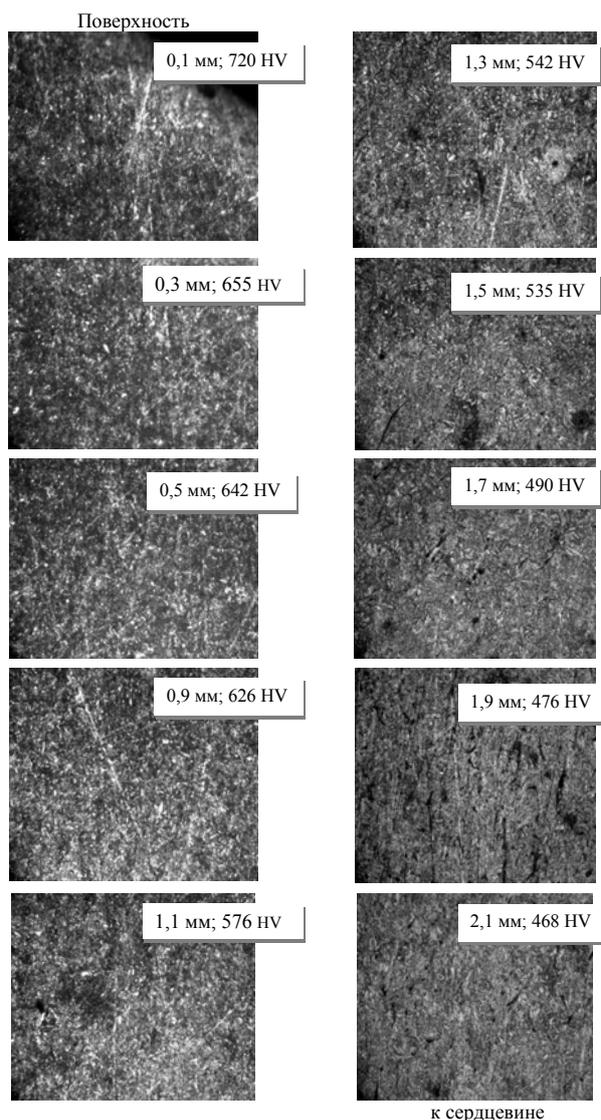


Рис. 7. Панорама микроструктуры и изменения микротвердости от поверхности по глубине цементованного слоя зуба шестерни фирмы «Joy» в направлении (1) (см. рис. 3в)

Таблица 2 – Глубина цементованного слоя и номер зерна исследованных образцов

Производитель шестерен из сталей (12-20)Х2Н4А	Глубина цементации, мм	Номер зерна	
		верх зуба	низ зуба
«ЯМЗ»	2,1	4-5	4-3
«Joy»	1,6	6-7	6
«МАГМА»	2,1	6-7	6-7

Из таблицы следует, что микроструктура шестерен производства «МАГМА» и «Joy» характеризуется сопоставимым номером зерна ~ 6–7, в то время как в шестернях производства «ЯМЗ» зерно крупнее ~ 4–5. При этом в основании зубьев последних и, очевидно, в теле шестерни номер зерна ~ 4–3. Укрупнение размеров структурных составляющих в направлении сердцевины отрицательно сказывается на ударной вязкости и увеличивает опасность хрупкого разрушения шестерен при эксплуатации. Авторы [9] считают, что размер зерна в цементованном слое высоконагруженных транс-

миссий должен быть регламентирован 8–11 номерами, что способствует повышению пластических и вязкостных свойств цементованного слоя при достаточно высокой его твердости.

Распределение микротвердости по глубине слоя исследованных сталей после цементации и последующей термообработки представлено на рис. 8. Как видно, максимальной твердостью упрочненного слоя (720 HV) обладают шестерни фирмы «Joy», а микротвердость шестерен отечественных производителей на ~ 100 HV ниже. На глубине цементованного слоя ~ 1 мм

микротвердость всех исследованных образцов становится примерно одинаковой и равной 550–570 HV. Эффективная толщина упрочненного слоя $h_{эф.}$ (твердость ≥ 51 HRC) в исследованных сталях составляет $\sim 1,6$ мм. Рекомендуемая твердость сердцевины – 33–45 HRC [6], что в целом соответствует твердости рассматриваемых деталей.

В табл. 3 представлен сравнительный анализ механических свойств материала шестерен различных производителей.

Как видно из таблицы, шестерни производства «МАГМА» и «Юу» обладают близкими механическими свойствами к требованиям ГОСТ4353-71, превосходя шестерни производства «ЯМЗ» по прочности, но уступают им по величине ударной вязкости. Эти показатели механических свойств соответствуют микроструктуре сердцевины низкоуглеродистого мартенсита (или троосто-мартенсита) с небольшим количеством ферритной составляющей, полученной при окончательной термической обработке деталей – закалке с 800–830 °С в масло и отпуску 160–180 °С.

Шестерни производства «Юу» и «ЯМЗ» характеризуются достаточно высокими показателями относительной износостойкости ($\varepsilon \sim 1,2$ и $1,4$ соответственно) и несколько большей - материал шестерен производства «МАГМА» ($\varepsilon = 1,5$). Однако после сошлифовки слоя чрезмерно большей, чем 0,4 мм толщины износостойкость заметно снижается, что необходимо учитывать при корректировке технологического режима окончательной механической обработки.

Выводы

1. Причинами отказа в работе и разрушения тяжело нагруженных шестерен горных машин являются не усталостный характер разрушения, а недостаточная прочность цементованного слоя на определенной глубине, а также может быть и в определяющей степени – экстремальные (и запредельные, осевые) перегрузки деталей в процессе эксплуатации. Распределение углерода по глубине цементованного слоя шестерен производства «МАГМА» в 1,5 раза превосходит таковое для деталей производства «Юу», что не исключает насыщение последних углеродом и азотом проведением нитроцементации.

2. Микроструктура цементованных слоев в шестернях производителей «Юу» и «МАГМА» состоит из мартенсита, карбидов и остаточного аустенита с номером зерна – 6–7, а производства «ЯМЗ» – троосто-мартенсита при более крупном зерне – номеров 4–5 и изменяется по глубине слоя согласно уменьшению содержания углерода.

3. Детали производства «Юу» и «МАГМА» по механическим свойствам соответствуют требованиям ГОСТ 4353-71, а производства «ЯМЗ» свойства несколько ниже.

4. Наиболее высокой относительной износостойкостью в условиях сухого трения скольжения обладают шестерни производства «МАГМА» ($\varepsilon = 1,5$) и «Юу» ($\varepsilon = 1,4$) и несколько меньшей – «ЯМЗ» ($\varepsilon = 1,2$). Целесообразно с осторожностью относиться к корректировке режима окончательной шлифовки на минимальную ($\leq 0,4$ мм) толщину.

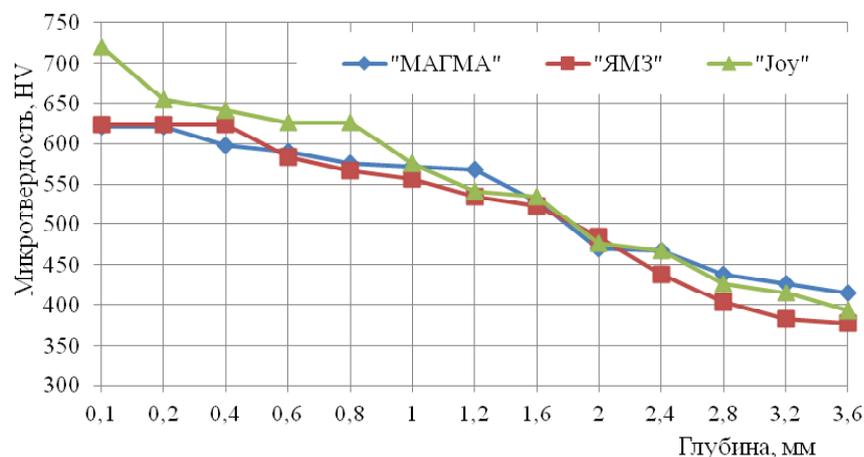


Рис. 8. Распределение микротвердости по глубине цементованного слоя исследованных шестерен

Таблица 3 – Сравнительная характеристики механических свойств материала шестерен ((12-20)X2H4A) разных производителей

Производитель шестерен	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	Ψ , %	KCU, Дж/см ²	ε	HRC поверхн.	HRC сердцев.
«Юу»	913	1082	14	57	72-104	1,4	62	46
«МАГМА»	914	1070	18	47	88	1,5	57	45
«ЯМЗ»	890	990	14	64	95	1,2	56	41
ГОСТ 4353-71	≥ 930	≥ 1130	≥ 10	≥ 50	≥ 88	-	56-63	33-45

5. В целом, по характеру изменения микроструктуры и микротвердости по толщине цементованного слоя, шестерни производства «МАГМА» в большей степени соответствуют американскому аналогу фирмы «Юу», что характеризует высокое качество производства.

Список литературы

1. Гаркунов Д. Н. Триботехника / Д. Н. Гаркунов. – М. : Машиностроение, 1989. – 328 с.
2. Основные направления развития поверхностного упрочнения зубчатых колес / [Б. А. Ляшенко, Э. К. Посвятенко, С. А. Довжук, Ф. Й. Златопольский] // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – 2011. – № 24. – С. 8–12.
3. Уманский В. Б. Упрочнение деталей металлургического оборудования / В. Б. Уманский, А. А. Костенко, Ю. Т. Худик. – М. : Металлургия, 1991. – 176 с.
4. Зинченко В. М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки / Зинченко В. М. – М. : Изд-во МГТУ, 2001. – 303 с.
5. Межгосударственный стандарт (проект, первая редакция) Колеса зубчатые виды поврежденных. Классификация и описание. 87 с. – Режим доступа: <https://eam.su/3-6-povrezhdeniya-zubchatyx-peredach.html>
6. Калашников А. С. Современные методы обработки зубчатых колес / А. С. Калашников, Ю. А. Моргунов, П. А. Калашников. – М. : Издательский дом «Спектр», 2012. – 238 с.
7. Счастливец В. М. Остаточный аустенит в легированных сталях / В. М. Счастливец, Ю. В. Калетина, Е. А. Фокина. – Екатеринбург, 2014. – 236 с.
8. Сагарадзе В. С. Повышение надежности цементуемых деталей / Сагарадзе В. С. – М. : Машиностроение, 1975. – 216 с.
9. Руденко С. П. Структурные особенности экономнолегированной стали 20ХГНМБ после химико-термического упрочнения / С. П. Руденко, А. А. Шипко, А. Л. Валько // Литье и металлургия. – №2 (75). – 2014. – С. 86–90.

Одержано 01.12.2018

Чейлях О.П., Булі С.А., Мак-Мак Н.С., Звонарьова М.І., Чейлях Я.О., Рябікіна М.А. Аналіз руйнування, микроструктури і властивостей важконавантажених шестерень різних виробників

Мета роботи: вивчення причин, характеру руйнування, структурних, механічних і експлуатаційних характеристик важконавантажених цементованих шестерень зі сталі 20Х2Н4А різних фірм-виробників для вдосконалення технології їх виробництва і підвищення працездатності.

Для дослідження причин руйнування були відібрані відпрацьовані шестерні виробництва фірми Joy Global Inc. («Юу») (США), ТОВ «МАГМА» і Ясинуватського машинобудівного заводу («ЯМЗ») (Україна) важконавантажених редукторів гірничопрохідницьких комбайнів, які повністю вийшли з ладу, виготовлені зі сталі 20Х2Н4А після цементації і повного циклу термічної обробки.

Методи дослідження. Макроскопічний (ГОСТ10243-75) і мікроскопічний аналізи, спектрографічний і квантометричний аналіз хімічного складу по глибині цементованого шару, вимірювання твердості за Роквеллом (HRC), микротвердості по глибині шару (ГОСТ9450-76), випробування механічних властивостей на розтягнення ГОСТ 1497-84, випробування зносостійкості тертям ковзання метал-метал.

Досліджено характер руйнування, макроструктура, микроструктура шестерень, розподіл вуглецю і микротвердість по глибині цементованого шару. Проведено порівняльні випробування на зношування в умовах сухого тертя ковзання.

Одержані результати. Встановлено, що причинами викришування активних поверхонь зубів важконавантажених шестерень гірничних машин з'явилася недостатня міцність цементованого шару на певній глибині, а також екстремальні перевантаження елементів зачеплення при експлуатації. Розподіл вуглецю по глибині цементованого шару шестерень виробництва «МАГМА» в 1,5 рази перевищує таку ж концентрацію для деталей виробництва «Юу», що не виключає насичення останніх вуглецем і азотом проведенням нітроцементації. Микроструктура зміцнених шарів в шестернях виробників «Юу» і «МАГМА» складається з дрібнодисперсного мартенситу, карбідів і залишкового аустеніту, співвідношення цих фаз змінюється по глибині шару відповідно до зменшення вмісту вуглецю. Механічні властивості зразків сталі 20Х2Н4А, вирізаних з шестерень зазначених виробників, відповідають вимогам ГОСТ 4353-71. Микроструктура шестерень виробництва «ЯМЗ» троостит-мартенситна при більшому зерні (номер 4–5), що зумовило отримання дещо меншої твердості і відносної зносостійкості. Найбільшу зносостійкість мають зразки, вирізані з шестерень виробництва «Юу» і «МАГМА», дещо меншу – «ЯМЗ».

Наукова новизна. На основі аналізу пошкоджуваності визначені причини виходу з ладу шестерень важконавантажених зубчастих передач різних виробників, що працюють у складних умовах експлуатації, проведені їх порівняльні дослідження і випробування властивостей. Встановлено характер зміни микроструктури, розподілу микротвердості залежно від концентрації вуглецю по товщині цементованого шару шестерень.

Практична цінність. Результати досліджень послужили науково-обґрунтованими рекомендаціями для вдосконалення технологічного процесу виробництва і зміцнення важконавантажених шестерень в умовах ТОВ «МАГМА» для підвищення їх експлуатаційних характеристик.

Ключові слова: цементований шар, мартенсит, залишковий метастабільний аустеніт, карбіди, микроструктура, властивості, зносостійкість.

Cheiliakh O., Buli S., Mak-Mak N., Zvonaryova M., Cheiliakh Ya., Ryabikina M. Analysis of destruction, microstructure and properties hard loaded gears of different manufacturers

Purpose. To study the causes, nature of destruction, structural, mechanical and operational characteristics of heavily loaded cemented gears from steel 20X2H4A with chemical composition (%): 0,17 C; 0,25 Si; 0,39 Mn; 1,33 Cr; 3,12 Ni; 0,022 W; 0,07 Mo; 0,01 Ti; 0,25 Cu; 0,016 S; 0,01 P of various manufacturers to improve the technology of their production and improve performance.

To investigate the causes of destruction, worn-out gears manufactured by Joy Global Inc. were selected. ("Joy") (USA), Machine-Building Enterprise "MAGMA" and Yasinovatsky Machine-Building Plant ("YaMZ") (Ukraine) of heavy-duty gearboxes of mining tunnel combines, completely out of order, made of 20X2H4A steel after cementation and a full heat treatment cycle.

Research methods. Macroscopic (GOST 10243-75) and microscopic analyzes, spectrographic and quantitative analysis of the chemical composition of the cemented layer depth, measurement of Rockwell hardness (HRC), microhardness of the layer depth (GOST 9450-76), tensile testing of mechanical properties GOST 1497-84, metal-to-metal friction wear resistance tests.

The nature of destruction, the macrostructure, the microstructure of gears, the distribution of carbon, and the microhardness over the depth of the cemented layer was investigated. Comparative wear tests under conditions of dry sliding friction were carried out.

Obtained results. It was established that the causes of chipping of the active surfaces of the teeth of the heavily loaded gears of mining machines were the insufficient strength of the cemented layer at a certain depth, as well as extreme overloading of the elements of the engagement during operation. The carbon distribution in the depth of the cemented layer of gears produced by "MAGMA" is 1,5 times higher than that for parts produced by "Joy", which does not exclude the latter being saturated with carbon and nitrogen by carbonitriding. The microstructure of the hardened layers in the gears of the manufacturers "Joy" and "MAGMA" consists of finely dispersed martensite, carbides and residual austenite, the ratio of these phases varies with the depth of the layer according to the decrease in carbon content. The mechanical properties of steel samples 20X2H4A, cut from the gears of the specified manufacturers, comply with the requirements of GOST 4353-71. The microstructure of gears produced by "YaMZ" is troostomartensitic with larger grains (number 4-5), which resulted in a somewhat lower hardness and relative wear resistance. Samples cut from the gears of the production "Joy" and "MAGMA" have the highest wear resistance, a little less – "YaMZ".

Scientific novelty. Based on the analysis of damage, the causes of failure of heavily loaded gears, operating in difficult operating conditions of different manufacturers, are determined, their comparative studies and testing properties are carried out. The nature of changes in the microstructure, the distribution of microhardness depending on the concentration of carbon in the thickness of the cemented layer of gears.

Practical value. The research results served as scientifically based recommendations for the improvement of the technological process of production and the hardening of heavily loaded gears in "MAGMA" to improve their performance.

Key words: cemented layer, martensite, residual metastable austenite, carbides, microstructure, properties, wear resistance.
