

В.Б. Тарельник, д.т.н., профессор, В.С. Марцинковский, к.т.н., доцент (Сумский национальный аграрный университет, г. Сумы, Украина)

Ремонт шеек валов роторов методом электроэрозионного легирования с последующим поверхностным пластическим деформированием

Разработана технология повышения качества шеек валов роторов при их ремонте с применением электроэрозионного легирования и последующей поверхностной пластической деформации.

Ключевые слова: вал, поверхностный слой, электроэрозионное легирование, пластическая деформация, структура, качество.

Розроблена технологія підвищення якості шийок валів роторів при їх ремонті із застосуванням електроерозійного легування і подальшої поверхневої пластичної деформації.

Ключові слова: вал, поверхневий шар, електроерозійне легування, пластична деформація, структура, якість.

Technology of upgrading of necks of billows of rotors is worked out at their repair with the use of the electro-erosive alloying and subsequent superficial flowage.

Keywords: billow, superficial layer, electric spark alloying, flowage, structure, quality.

Причиной поломки деталей при эксплуатации, как правило, являются процессы, протекающие преимущественно в поверхностном слое: концентрация напряжений, развитие микротрещин, выгорание легирующих элементов, разупрочнение, изнашивание, окисление, перераспределение остаточных напряжений и т.д.

С целью повышения таких эксплуатационных характеристик деталей, как выносливость, износостойкость все шире применяют методы поверхностного пластического деформирования (ППД).

Сущность метода ППД состоит в том, что под давлением движущегося деформирующего элемента (например, ролика, шарика или выглаживателя) металл выступов неровностей и тонкого поверхностного слоя в месте контакта с деформирующим элементом, находясь в условиях объемного напряженного состояния, пластически деформируется и перемещается, затекая в смежные впадины и выдавливаясь из них вверх. В результате этого образуется качественно новая поверхность с неровностями специфической формы, которую нельзя получить при лезвийных и абразивных способах обработки.

Для вновь образованного микрорельефа упрочненной поверхности характерно: большое отноше-

ние шага неровностей к их высоте; высокая степень однородности неровностей как по форме, так и по высоте; малые углы наклона; большие радиусы скругления вершин выступов и дна впадин, что определяет пологую обтекаемую форму неровностей. Наряду со сглаживанием неровностей повышается прочность слоя с образованием в нем сжимающих напряжений.

Важное значение в практике машиностроения имеют покрытия, которые могут быть сформированы различными способами. Основной их задачей является улучшение качественных параметров поверхностного слоя: повышение микротвердости, износостойкости, восстановление изношенных участков поверхности и др.

Одной из перспективных технологий повышения качества поверхностей деталей является метод электроэрозионного легирования (ЭЭЛ). К его достоинствам следует отнести простоту автоматизации, «встраиваемости» в технологический процесс изготовления деталей и совмещения операций. Он универсален и используется для увеличения твердости, коррозионной стойкости, износо- и жаростойкости; снижения способности к схватыванию поверхностей при трении; восстановлению размеров деталей машин и механизмов; про-

ведения на обрабатываемой поверхности микрометаллургических процессов для образования на ней необходимых химических соединений; создания на рабочей поверхности переходных слоев определенной шероховатости и др. [1].

Несмотря на достоинства метод ЭЭЛ имеет и ряд недостатков (увеличение шероховатости поверхности, возникновение в поверхностном слое растягивающих остаточных напряжений, снижение усталостной прочности), которые нередко ограничивают его применение для ряда деталей машин.

Очевидно, применение ППД в сочетании с ЭЭЛ поверхностного слоя представляет особый интерес, так как эти технологии взаимно дополняют друг друга [2-4]. Однако недостаточное количество данных, касающихся анализа процессов ППД поверхностных слоев, предварительного упрочненных ЭЭЛ, сдерживает развитие рассматриваемого комплекса упрочняющих технологий. Следовательно, работы, проводимые в этом направлении актуальны.

Целью работы является повышение качества шеек валов роторов при их ремонте путем определения алгоритма расчета технологических параметров воздействия методами ППД на поверхности, обработанные ЭЭЛ.

Анализ напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя после ЭЭЛ и последующего ППД

Ниже представлена методика расчета геометрических параметров очага деформации для поверхностных слоев со сложной структурой, которые получают при ЭЭЛ. Она разработана на основании расчета главных геометрических параметров очага деформации для однородных тел – инженерного метода М.С. Дрозда и базируется на понятии пластической твердости (НД).

Для удобства сравнения с твердостью по Бринеллю предложено считать числом пластической твердости НД отношение:

$$НД = \frac{P - P_0}{\pi D h}, \quad (1)$$

где P – произвольная нагрузка; P_0 – критическая нагрузка, численно равная отрезку, отсекаемому линейной аппроксимацией функции $P=f(h)$ на оси P ; D – диаметр внедряемого шарика; h – глубина остаточной вмятины.

Переход от твердости НВ, параметра, характеризующего сопротивление металла контактному нагружению, к пластической твердости НД, интерпретируемой как модуль упрочнения материала, позволяет также рассматривать эту величину как характеристику сопротивления материала контактной пластической деформации. Следует отметить, что в случае ППД упрочненных ЭЭЛ слоев такая характеристика их физико-механических свойств физически более обоснована и удобна, поскольку фактически определяет способность слоя к упрочнению в процессе ППД и, таким образом, изменению эксплуатационных свойств данного слоя.

Ранее получено, что формирование структуры поверхностного ЭЭЛ слоя во многом зависит от твердости материала легирующего электрода и последовательности нанесения слоев [5]. Установлено также, что в случае ЭЭЛ твердыми износостойкими материалами, на поверхности катода (детали) возникает «белый» слой, который, как правило, имеет твердость значительно выше твердости основного металла. Под «белым» слоем расположена переходная зона – подслой, представляющий собой область термического воздействия импульсных разрядов и диффузии

онного взаимопроникновения элементов анода и катода. Твердость этой зоны плавно изменяется по глубине по сравнению с твердостью «белого» слоя.

В случае ЭЭЛ мягкими антифрикционными материалами микротвердость поверхностного слоя значительно снижается, изменяя тем самым механизм упрочнения поверхностного слоя.

Комбинированные электроэрозионные покрытия (КЭП), в зависимости от последовательности нанесения твердых и мягких материалов, могут иметь различную микротвердость как на поверхности, так и по мере углубления. Поэтому, рассматривая КЭП с позиций последующего их упрочнения ППД, в зависимости от микротвердости, механизм их упрочнения может быть идентичен в первом случае упрочнению покрытий из твердых износостойких, а во втором – из мягких антифрикционных материалов.

Учитывая выше сказанное, следует отметить, что повышение качества ЭЭЛ слоев ППД (снижение шероховатости, повышение микротвердости и т.д.) во многом зависит от структуры легированного слоя и от правильно выбранных режимов силового воздействия на них.

При ЭЭЛ как твердыми износостойкими, так и мягкими антифрикционными материалами, за исключением легирования углеродом (графитовым электродом), толщина изделия увеличивается на толщину сформированного ЭЭЛ слоя ($\Delta h_{с.с.}$).

В случае ЭЭЛ вала его диаметр (D_0) будет увеличен на $2\Delta h_{с.с.}$

Рассмотрим изменение геометрических параметров контактирующих тел в зависимости от микротвердости структуры сформированных ЭЭЛ покрытий.

В случае наличия твердого покрытия (рис.1, а), сферический индентор, под воздействием приложенной к нему нагрузки P , вминает твердый «белый» слой в более мягкий переходной подслои, упрочняя при этом последний. «Белый» слой служит как бы передаточным звеном, увеличивая радиус воздействия индентора на величину, равную толщине «белого» слоя ($\Delta h_{с.с.}$), и уменьшая диаметр вала на $2\Delta h_{с.с.}$

В случае, когда ЭЭЛ производится мягкими антифрикционными материалами (рис. 1, б),

величина радиуса сферического индентора остается без изменений, а диаметр вала увеличивается на $2\Delta h_{с.с.}$. Деформированию и упрочнению в этом случае подвергаются как мягкий поверхностный слой, так и подслой (переходной слой).

В последнее время в технологии ремонта подшипниковых шеек валов роторов все чаще используется легирование углеродом (графитовым электродом) с последующей обработкой ППД. Легирование углеродом представляет собой метод цементации электроэрозионным легированием (ЦЭЭЛ) [6, 7]. По сравнению с обычной цементацией, способ цементации стальных деталей электроэрозионным легированием обладает рядом достоинств, присущих методу ЭЭЛ. Это прежде всего возможность проведения процесса в локальном месте, отсутствие поводок и кораблений, многократная экономия энергоресурсов, малогабаритное и транспортабельное оборудование и др.

При цементации методом ЭЭЛ толщина упрочненного слоя на-

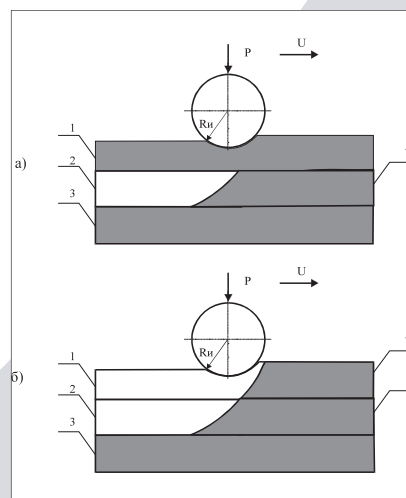


Рис. 1. Схема ППД электроэрозионных покрытий из: а) твердых износостойких материалов: 1 – недеформируемый «белый» слой; 2 – упрочненный переходной слой; 3 – основной металл; 4 – неупрочненный антифрикционных металлов; б) мягких антифрикционных металлов: 1 – упрочненный поверхностный слой; 2 – упрочненный переходной слой; 3 – основной металл; 4 – неупрочненный поверхностный слой; 5 – неупрочненный переходной слой

прямою зависит от энергии разряда и времени легирования. С увеличением энергии разряда увеличивается не только глубина упрочненного слоя, но и шероховатость поверхности.

Обработка ППД после ЦЭАЛ производится с целью снижения шероховатости поверхности и повышения усталостной прочности вала. Кроме того, при ЦЭАЛ ранее термообработанных деталей, под слоем повышенной твердости может возникнуть слой пониженной твердости так называемый «провал твердости», который можно устранить последующей обработкой ППД.

В [8] с целью повышения качества поверхности предлагается перед обработкой ППД на цементированный слой наносить покрытия толщиной 0,02-0,05 мм на диаметр из мягких антифрикционных материалов, например, меди, серебра и др.

Учитывая выше сказанное, следует отметить, что повышенные качества цементированных ЭАЛ слоев методом ППД (снижение шероховатости, повышение микротвердости и т.д.) во многом зависит от структуры легированного слоя и от правильно выбранных режимов силового воздействия на них.

Геометрические параметры контактирующих тел ниже корректируются с учетом параметра толщины цементированного слоя ($\Delta h_{\text{ц}}$) и толщины слоя из мягкого антифрикционного металла ($\Delta h_{\text{а}}$).

Сферический индентор (рис. 2, а) под воздействием приложенной к нему нагрузки P вминает твердый цементированный слой в более мягкий переходной подслоя, упрочняя при этом последний. Цементированный слой служит как бы передаточным звеном, увеличивая радиус воздействия индентора на величину, равную его толщине ($\Delta h_{\text{ц}}$), и уменьшая диаметр вала на $2\Delta h_{\text{ц}}$.

В случае ЭАЛ мягкими антифрикционными материалами микротвердость поверхностного слоя снижается, изменяя тем самым механизм упрочнения поверхностного слоя. После цементации мягкими металлами его диаметр (D_0) будет увеличен на $2\Delta h_{\text{ц}}$, а радиус индентора не изменится. Деформированию и упрочнению в этом случае подвергается мягкий поверхностный слой, а переходной, в данном слу-

чае цементированный слой, не упрочняется (рис. 2, б).

Проведенный анализ напряженно-деформированного состояния ЭАЛ слоев различной твердости, подвергаемых последующей ППД позволил определить геометрические параметры очага деформации, а также глубину наклепанного слоя (h_s) и интенсивность деформации (ϵ_{i0}) для различных покрытий из твердых и мягких металлов, КЭП, а также поверхностных слоев после ЦЭАЛ. Все необходимые для расчетов данные представлены в табл. 1.

Влияние основных технологических параметров ППД на микрогеометрию, структуру и свойства ЭАЛ слоев

Определение силовых и деформационных параметров ППД ЭАЛ слоев различной твердости позволило обобщить результаты исследования микрогеометрии поверхностного слоя, его структуры и свойств.

Режимы ППД образцов алмазным выглаживанием (АВ) и обкаткой шариком (ОШ) после ЭАЛ хромом, вольфрамом и никелем приведены в табл. 2.

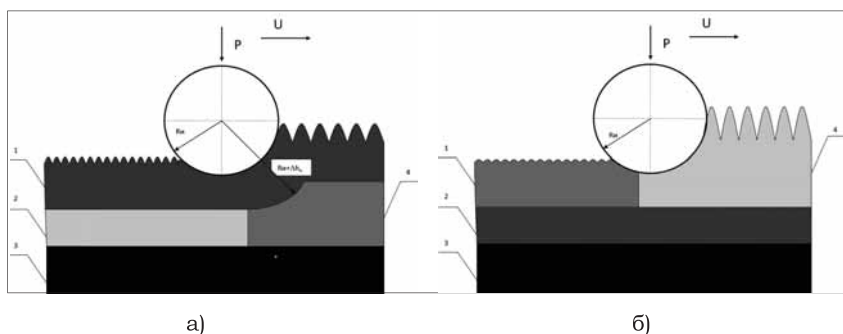


Рис. 2. Схема ППД поверхностных слоев: а) после ЦЭАЛ: 1 – твердый цементированный слой, 2 – мягкий упрочненный переходной подслоя, 3 – основной металл, 4 – неупрочненный переходной подслоя; б) из мягких антифрикционных металлов, нанесенных на цементированный поверхностный слой: 1 – упрочненный мягкий поверхностный слой, 2 – цементированный слой, 3 – основной металл, 4 – неупрочненный мягкий поверхностный слой

Таблица 1. Исследуемые твердые, мягкие и комбинированные ЭАЛ покрытия, а также поверхностные слои после ЦЭАЛ

Состав покрытия	Материал подложки	Твердость слоя НД, МПа	Толщина слоя, мкм	Оборудование
Cr	Сталь 45	3000	30	УИЛВ-8
W	Сталь 45	2800	25	УИЛВ-8
Ni	Сталь 45	2250	40	УИЛВ-8
BK8	Сталь 45	3200	20	УИЛВ-8
Графит Эг-4	Сталь 45	2700	10	УИЛВ-8
Sn	Сталь 45	1000	60	УИЛВ-8
Cu	Сталь 40X	1700	200	ЭИЛ-9
ВНС2 + Cu + ВНС2	Сталь 40X	2540	400	ЭИЛ-9
Cu + BK8	Сталь 45	3000	30	УИЛВ-8
In + BK8	Сталь 45	1800	30	УИЛВ-8
Sn + Cr	Сталь 45	2000	30	УИЛВ-8
BK8 + Cu + BK8	Сталь 45	2500	35	УИЛВ-8

Таблица 2. Режимы ППД образцов после ЭЭЛ хромом, вольфрамом и никелем*

Размер индентора (r при АВ или Ø при ОШ), мм	Нагрузка на индентор, P, Н	Удельное усилие деформации P_{cp} , МПа
Алмазное выглаживание**		
1	150	4500
1	150	4500
1	100	3200
2	150	3000
2	150	3000
2	80	1620
3	150	1920
3	200	2560
3	220	2830
4	150	1330
4	220	1900
4	250	2210
Обкатка шариком***		
19	1000	1380
19	1200	1640
19	1500	2060
10	600	940
10	1100	1700
10	1200	1900

* Число проходов $n = 1$.

** Подача $S = 0,05$ мм/об.

*** Подача $S = 0,1$ мм/об.

Ra , мкм

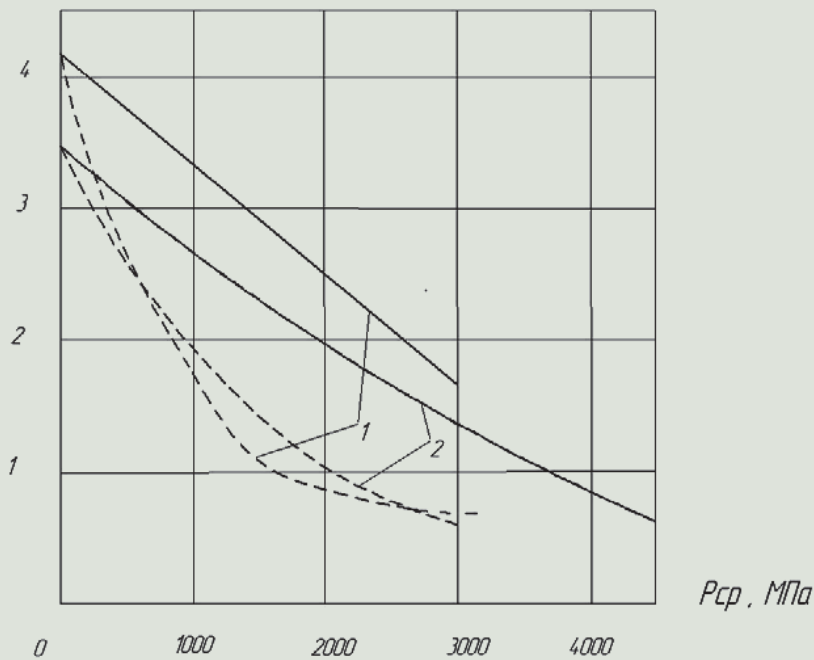


Рис. 3. Зависимость шероховатости стали 45 ЭЭЛ вольфрамом (1) и хромом (2) от удельного усилия АВ при $R = 1$ мм (сплошные линии) и $R = 2$ мм (штриховые)

Результаты измерения шероховатости показаны на рис. 3-5 в виде зависимостей $Ra = f(P_{cp})$, где P_{cp} – удельное усилие обкатки, определяемое по соотношению

$$P_c = \frac{P}{\pi ab}, \quad (2)$$

здесь P – полное усилие обкатки; a, b – полуоси контура остаточной вмятины (табл. 2).

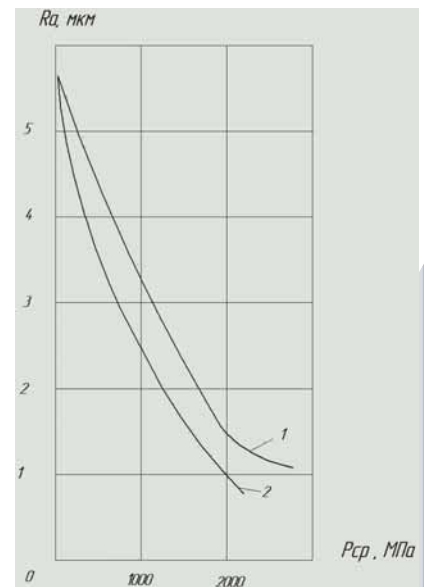


Рис. 4. Зависимость шероховатости стали 45 ЭЭЛ никелем от удельного усилия АВ при $R = 3$ мм (1) и $R = 4$ мм (2)

Ra , мкм

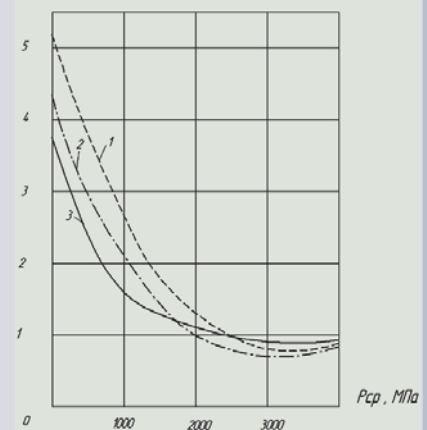


Рис. 5. Зависимость шероховатости стали 45 ЭЭЛ никелем (1), вольфрамом (2) и хромом (3) от удельного усилия ОШ

Из приведенных данных следует, что эффективность ППД, как метода снижения шероховатости поверхности, зависит от удельного усилия обкатки и способа ЭЭЛ. Если для покрытий, полученных с применением вольфрамового электрода, величина R_a в значительной степени определяется радиусом алмазного индентора, то с увеличением пластичности покрытия (электроды из хрома и никеля) влияние радиуса индентора уменьшается. Характерно, что при ППД обкаткой шариком практически все точки зависимости $R_a=f(P_{cp})$ укладываются на одну кривую для всех покрытий, независимо от вида ЭЭЛ. Этот факт свидетельствует, по крайней мере, о наличии общего механизма формирования поверхности, суть которого, прежде всего, заключается в комбинации двух процессов: деформации мягкой подложки покрытия и среза микронеровностей.

Анализ микроструктуры ЭЭЛ поверхностного слоя стали 45 хромом после АВ показал, что наиболее предпочтительным является АВ инденторами $R=3$ мм и $R=4$ мм при удельных усилиях 1920 и 1330 МПа соответственно, (рис. 6, а, б). Выглаженная поверхность имеет меньшую шероховатость, макронарушений в слое не наблюдается. Распределение твердости равномерное, причем твердость плавно снижается по мере увеличения глубины измерения и находится на уровне 7500 – 8000 МПа. К практическому применению может быть рекомендовано АВ индентором $R=4$ мм при удельном усилии выглаживания 1330 МПа (рис 6, б).

Наиболее благоприятная ситуация при обкатке хромового покрытия шариком диаметром 10 мм при удельном усилии обкатки $P_{cp}=1700$ МПа, где имеется слой практически по всей линии шлифа (рис. 6, в).

Наиболее благоприятный вариант при АВ образца из стали 45 с вольфрамовым покрытием, который можно рекомендовать для использования (рис. 7, а), когда радиус алмазного выглаживания $R=2$ мм, а $P_{cp}=1620$ МПа. В этом случае слой достаточно хорошего качества с ровной поверхностью линии шлифа. «Белый» слой с твердостью 7500 МПа, переходная зона с плавно понижающейся твердостью.

При ОШ диаметром 19 мм при удельном усилии обкатки 1380 МПа поверхностного слоя образца стали

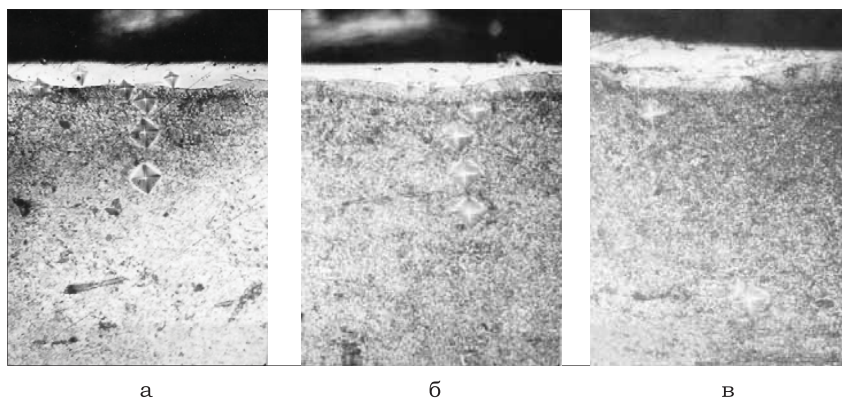


Рис. 6. Микроструктура поверхностных слоев ЭЭЛ хромом после АВ: (а – $R=3$ мм, $P_{cp}=1920$ МПа; б – $R=4$ мм, $P_{cp}=1330$ МПа) и ОШ: (в – $D_{ш}=10$ мм, $P_{cp}=1700$ МПа). $\times 400$

45 ЭЭЛ вольфрамом наблюдается слой хорошего качества: «белый» слой с твердостью 8000 МПа, зазоры отсутствуют, поверхность ровная, провалов твердости нет, происходит постепенное снижение твердости от поверхности к основе. В образце ОШ диаметром 10 мм при удельном усилии обкатки $P_{cp}=940$ МПа слой тоже хорошего качества. При увеличении удельного усилия обкатки до 2060 и 1700 МПа при обкатке шариками 19 мм и 10 мм, соответственно, наблюдается повреждение слоя. Местами «белый» слой очень тонкий. Наиболее рациональным может быть вариант ОШ, когда диаметр шарика 19 мм, а удельное усилие $P_{cp}=1380$ МПа (рис. 7, б).

Характерным для ЭЭЛ стали 45 никелем является наличие массивного по толщине нанесенного слоя – до 60 мкм. После АВ слой утоняется, а качество его ухудшается. Буквально на всех режимах наблюдается интенсивное разрушение слоя, образование закатов, вырывов и т.п. На многих образцах слой практически отсутствует. Из этого следует, что АВ при ЭЭЛ

никелем, когда образуется мягкий слой ($H_{\mu}=2000$ МПа), действует отрицательно и его использование нежелательно.

Положительное влияние на качество ЭЭЛ никелем слоя оказывает ОШ. Так, при ОШ диаметром 19 мм и удельном усилии выглаживания $P_{cp}=1380$ МПа образуется слой толщиной 30 мкм с твердостью до 3000 МПа. Подобная картина наблюдается и при ОШ диаметром 10 мм с удельным усилии выглаживания 940 МПа. Предпочтительным является ОШ диаметром 19 мм и удельное усилие выглаживания $P_{cp}=1700$ МПа. В этом случае слой равномерный по всей длине, твердость его достигает 2800- 3000 МПа. В диффузионной зоне твердость выше, она колеблется в пределах 4000-5000 МПа. Очевидно, что здесь сказывается упрочнение ППД. Аналогичная ситуация складывается и при ОШ диаметром 10 мм и удельном усилии выглаживания $P_{cp}=2060$ МПа (рис. 8). Важным представляется повышение твердости как в «белом» слое, так и в переходной зоне. С увеличением удельного усилия об-

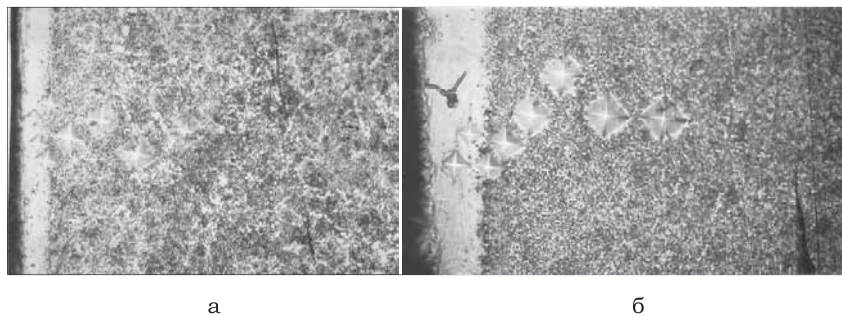


Рис. 7. Микроструктура поверхностного слоя ЭЭЛ вольфрамом после АВ: (а – индентором $R=2$ мм, $P_{cp}=1620$ МПа) и ОШ: (б – $D_{ш}=19$ мм, $P_{cp}=1380$ МПа). $\times 400$



Рис. 8. Микроструктура поверхностных слоев ЭЭЛ никелем после обкатки шариком $D_{ш}=10$ мм, $P_{cp}=2060$ МПа. $\times 400$

катки происходит деформационное упрочнение поверхностного слоя, которое становится существенным по мере увеличения глубины слоя. В результате наклепа твердость повышается до уровня 6000-6700 МПа, т.е. до значений твердости слоя, например при ЭЭЛ хромом.

В случае предварительного использования ППД, ЭЭЛ и окончательного ППД металлографический анализ показывает неприемлемость

такой схемы. Практически на всех режимах ППД приводит к повреждению поверхности, получению текстуры деформации, закатам.

На рис. 9 изображена зависимость микротвердости «белого» слоя образцов из стали 45 ЭЭЛ хромом, вольфрамом и никелем от удельного усилия обкатки $H_{\mu,с.}=f(P_{cp})$ при ОШ и АВ. Как при ОШ, так и при АВ, микротвердость слоев ЭЭЛ хромом и вольфрамом по мере возрастания удельного усилия выглаживания (P_{cp}) практически не изменяется и лишь при достижении $P_{cp}=4500$ МПа для хромового покрытия и $P_{cp}=3000$ МПа для вольфрамового покрытия незначительно снижается, соответственно с 7500 до 7000 МПа и с 7000 до 6500 МПа. При АВ никелевого покрытия микротвердость белого слоя повышается незначительно, если судить по микротвердости сохранившихся участков (от 2000 до 3000 МПа) при достижении удельного усилия выглаживания 2060 МПа. Иная кар-

тина при ОШ никелевого покрытия. Здесь, по мере возрастания удельного усилия обкатки, микротвердость белого слоя возрастает, и при достижении $P_{cp}=2060$ МПа составляет 5400 МПа.

На рис. 10 представлена зависимость микротвердости подслоя образцов из стали 45 ЭЭЛ хромом, вольфрамом и никелем от удельного усилия обкатки $H_{\mu,с.}=f(P_{cp})$ при ОШ и АВ. Как видно из рисунка, микротвердость подслоя при ЭЭЛ хромом, вольфрамом и никелем возрастает по мере увеличения удельного усилия выглаживания. Характерно, что с увеличением пластичности материала увеличивается его способность к упрочнению. Так, при АВ микротвердость подслоя вольфрамового покрытия возросла с от 4500 до 5000, хромового от 4000 до 5000 и никелевого от 2000 до 3700 МПа. При ОШ микротвердость вольфрамового покрытия возросла с 4500 до 5000, хромового от 4000 до 4500 и никелевого с 2000 до 6700 МПа.

В случае ОШ стальных образцов, легированных мягкими антифрикционными металлами, с увеличением удельного усилия деформации (P_{cp}) снижается шероховатость поверхностного слоя. Усилие обкатки зависит от микротвердости покрытия и величины исходной шероховатости. Так, если для снижения шероховатости поверхности стали 45, легированной оловом и имеющей микротвердость $H_{\mu}=800$ МПа с $R_a=4,5$ мкм до $R_a=0,5$ мкм, необходимо удельное усилие деформации ~ 750 МПа, то для получения такой же шероховатости поверхности, легированной медью и имеющей соответственно исходную микротвердость и шероховатость 1300 МПа и 12 мкм, требуется удельное усилие деформации ~ 1250 МПа. Дальнейшее увеличение удельного усилия деформации приводит к увеличению шероховатости, появлению на поверхности различных дефектов. Очевидно, что чем меньше исходные микротвердость и шероховатость поверхностного слоя, тем меньше удельное усилие деформации необходимо для его выглаживания.

Исследование микротвердости покрытий из мягких антифрикционных металлов показывает, что увеличение удельного усилия деформации ОШ, наряду со снижением шероховатости, приводит к увеличению микро-

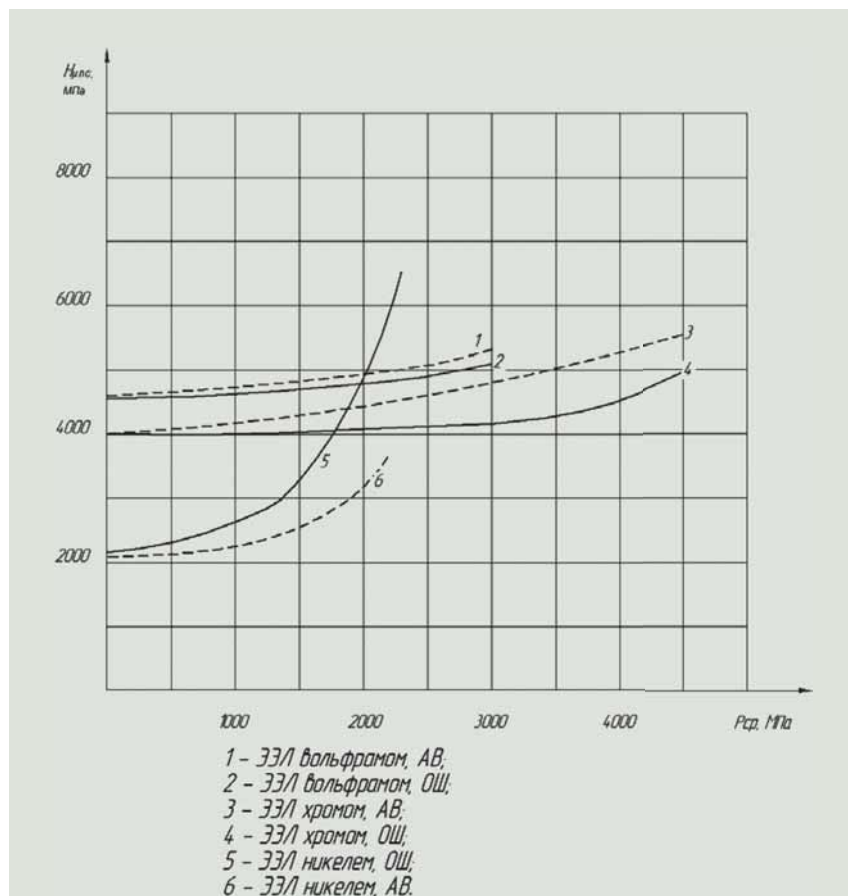


Рис. 9. Влияние удельного усилия АВ и ОШ на микротвердость белого слоя образцов из стали 45 ЭЭЛ: 1 - хромом, АВ; 2 - хромом, ОШ; 3 - вольфрамом, АВ; 4 - вольфрамом, ОШ; 5 - никелем, ОШ; 6 - никелем, АВ

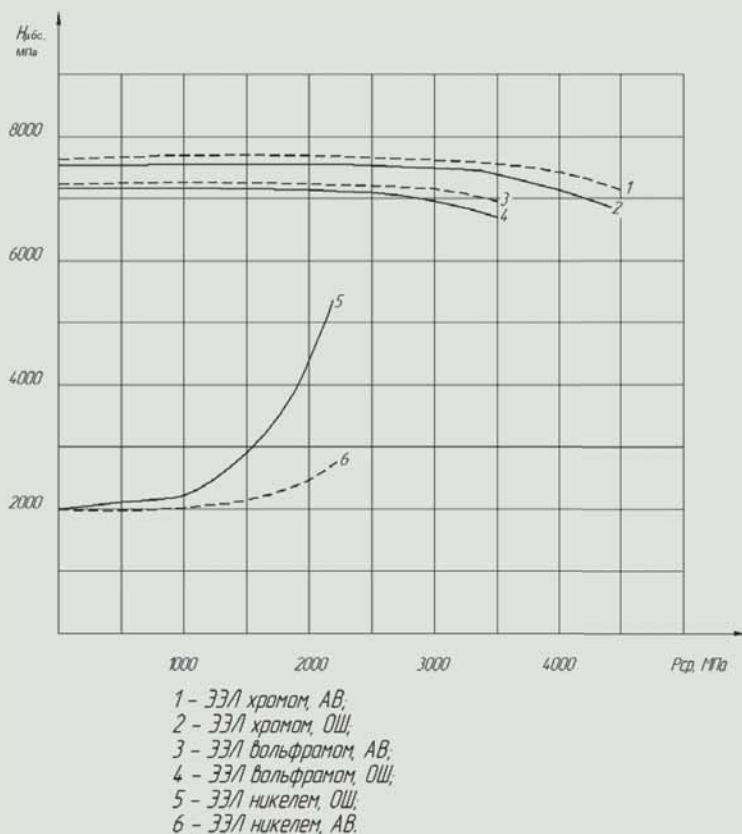


Рис. 10. Влияние удельного усилия АВ и ОШ на микротвердость подслоя образцов из стали 45 ЭЭЛ: 1 – вольфрамом, АВ; 2 – вольфрамом, ОШ; 3 – хромом, АВ; 4 – хромом, ОШ; 5 – никелем, ОШ; 6 – никелем, АВ

твердости как в самом слое, так и в переходном подслое.

В случае силового воздействия ОШ на КЭП, сформированные на установке с ручным вибратором «УИЛВ-8» и имеющие низкую исходную шероховатость ($R_a=0,48...0,52$ мкм), практически все точки зависимости $R_a=f(P_{cp})$ укладываются на одну прямую и шероховатость снижается до $R_a=0,1$ мкм.

Иная картина в случае силового воздействия ОШ на КЭП, сформированные на механизированной установке «ЭИЛ-9» и имеющие исходную шероховатость $R_a \geq 12$ мкм. В данном случае КЭП могут достигать по толщине 1 мм и более, что наряду с высокой шероховатостью и микротвердостью требует гораздо больших удельных усилий выглаживания.

Так, чтобы снизить шероховатость КЭП, состоящего из высокопрочной нержавеющей стали ВНС2 (08Х15Н5Д2Т) и меди, с $R_a=12$ мм до $R_a=1$ мм, необходимо приложить удельное усилие ~ 3000 МПа.

Металлографические исследования КЭП, сформированных на установке с ручным вибратором «УИЛВ-8», показывают, что для получения качественных поверхностных слоев необходимо использовать удельные усилия выглаживания 1000 - 1300 МПа.

В случае, если микротвердость поверхностного слоя высокая, например, КЭП состава $Cu+VK8$ ($H_\mu \geq 10000$ МПа) или $VK8 + Cu + VK8$ ($H_\mu=8000$ МПа), то сам слой не упрочняется, а вмывается в более мягкий подслой, упрочняя последний. В противном случае, если микротвердость поверхностного слоя низкая, например, КЭП состава $In+VK8$ ($H_\mu=1970$ МПа), то упрочняется сам слой.

Микротвердость в переходном слое (подслое) для всех КЭП возрастает, но в различной степени. Здесь также существует закономерность - чем ниже исходная микротвердость подслоя КЭП, тем больше резервы ее повышения. Так, микротвердость КЭП: $In + VK8$, $Cu + VK8$, $VK8 + Cu + VK8$ возрастает соответ-

ственно с 3500 до 4500 МПа; с 2500 до 4000 МПа; с 2800 до 4000 МПа при возрастании удельного усилия ОШ до 2000 МПа и для КЭП состава $VNS2 + Cu + VNS2$ с 2540 до 5000 МПа при $P_{cp}=4000$ МПа.

В результате металлографических исследований образцов из стали 45 с покрытиями из мягких антифрикционных металлов (олово, медь и др.), подвергнутых последующей ППД алмазным выглаживанием, установлено, что АВ не рекомендуется применять для мягких покрытий, так как практически на всех режимах выглаживания происходит интенсивное разрушение слоя: образование закатов, вырывов, наволакивание материала покрытия на индентор, срезание слоя и т.д.

Для повышения качества КЭП с высокой микротвердостью и низкой исходной шероховатостью возможно применение АВ. В результате исследования влияния удельного усилия АВ на микротвердость слоя и подслоя КЭП состава $Cu+VK8$ и $VK8+Cu+VK8$ установлено, что с увеличением удельного усилия выглаживания микротвердость слоя не изменяется до $P_{cp}=1000$ МПа, а затем несколько снижается, что свидетельствует о начале разрушения сформированного покрытия, подтвержденное фотографиями микроструктуры. Микротвердость в подслое повышается для покрытия $Cu+VK8$ с 2500 до 4500 МПа, а $VK8+Cu+VK8$ с 2800 до 5000 МПа.

Наиболее рациональное удельное усилие АВ, как и для покрытий из твердых износостойких материалов, соответствует 1000 МПа.

При повышении качества поверхностного слоя, подверженного ЦЭЭЛ, в последнее время используют ППД методом БУФО (безабразивной ультразвуковой финишной обработки металлов). Применение этого метода наиболее эффективно, когда шероховатость слоя после ЦЭЭЛ не превышает $R_a=2,0$ мкм и ее методом БУФО можно снизить до 0,6 - 0,8 мкм. Когда шероховатость поверхности выше, то на цементированный слой можно наносить методом ЭЭЛ покрытия толщиной 0,02 - 0,05 мм на диаметр из мягких антифрикционных (меди, серебра и др.) или более пластичных (никель, сталь 12Х18Н10Т и др.) материалов.

Проведенные исследования позволили рекомендовать для повышения качественных параметров ЭЭЛ поверхностного слоя наиболее

рациональные удельные усилия деформации (табл. 3).

Практическое применение интегрированной технологии ЭЭЛ + ППД шеек валов роторов

Во ВНИИкомпрессормаше, г. Сумы, проводились работы по ремонту подшипниковых шеек ротора компрессора. На рис. 11, а изображен ротор компрессора с восстановленной шейкой Ø50 мм, а на рис. 11, б – сама шейка, восстановленная на 0,5 мм на диаметр. В данном случае в качестве материала электродов поочередно наносились сталь ВНС-2 и медь, а ППД производилось ОШ Ø19 мм с удельным усилием выплаживания 2500 МПа.

В Новомосковске на ЗАО «МХК «ЕвроХим» представителями ООО «Триз» были проведены работы по ремонту подшипниковых шеек ротора турбокомпрессора ГТТ – 3 методом ЭЭЛ с последующим ППД.

Визуальный осмотр подшипниковых шеек показал, что в результате

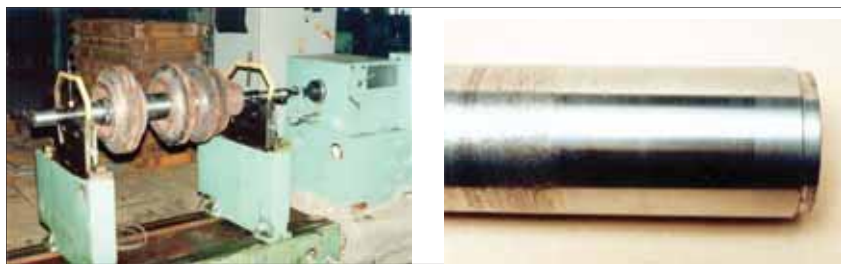
абразивного износа на поверхностях трения присутствует ряд замкнутых цилиндрических канавок различной глубины и ширины.

Ротор был установлен на токарно-винторезном станке с удлиненной станиной, где места задира шеек шлифовались абразивной шкуркой и после чего производился их обмер. В результате диаметр опорно-упорной шейки в различных местах составлял

149,65-149,66 мм, а опорной 149,68-149,69 мм. На рис. 12, а и 12, б показаны соответственно ЭЭЛ и ППД подшипниковых шеек ротора обкаткой шариком.

Обмер шеек ротора после выполнения работ показал, что их размер увеличился на 0,02 мм.

В ООО «Триз», г. Сумы при упрочнении зубьев вал-шестерни и зубчатого колеса мультипликатора



а

б

Рис. 11. Ротор компрессора (а) с шейкой Ø50, восстановленной под подшипник скольжения (б)

Таблица 3. Рекомендуемые удельные усилия деформации ЭЭЛ слоев различной твердости и результаты их воздействия на микрогеометрию и микротвердость сформированных покрытий

Покрытие	Установка ЭЭЛ	P _{ср} , МПа	Ra после ППД, мкм	Микротвердость до ППД, Н _ц , МПа	Микротвердость после ППД, Н _ц , МПа		
				слой	подслой	слой	подслой
Покрытия из твердых износостойких металлов							
Cr	«УИЛВ-8»	ОШ 1700	0,5	8000	4000	8000	4500
	«УИЛВ-8»	АВ1330	0,4	8000	4000	8000	4500
W	«УИЛВ-8»	ОШ1380	0,6	7800	4300	7800	5000
	«УИЛВ-8»	АВ1620	0,6	7800	4300	7800	5000
Ni	«УИЛВ-8»	ОШ1700	0,5	2000	2000	3000	5500
	«УИЛВ-8»	АВ*					
Покрытия из мягких антифрикционных металлов							
Sn	«УИЛВ-8»	ОШ 750	0,5	800	1500	1500	2300
Sn		АВ*					
Cu	«УИЛВ-8»	ОШ 1000	0,1	1600	2000	3000	2500
Cu	«УИЛВ-8»	АВ*					
Cu	«ЭИЛ-9»	ОШ 1250	0,5	1300	2100	2500	3000
Cu		АВ*					
Комбинированные электроэрозионные покрытия							
In + ВК8	«УИЛВ-8»	ОШ 1000	0,1	1970	3500	5000	5000
In + ВК8	«УИЛВ-8»	АВ*					
Cu + ВК8	«УИЛВ-8»	ОШ 1300	0,1	10490	2500	10490	3300
Cu + ВК8	«УИЛВ-8»	АВ 1000	0,1	10490	2500	10490	3200
ВК8 + Cu + ВК8	«УИЛВ-8»	ОШ 1300	0,1	8100	2800	8100	3500
ВК8 + Cu + ВК8	«УИЛВ-8»	АВ 1000	0,1	8100	2800	8100	3500
ВНС2 + Cu + ВНС2	«ЭИЛ-9»	ОШ 2500	1,0	3500	2500	4000	3000
ВНС2 + Cu + ВНС2	«ЭИЛ-9»	АВ*					

* - АВ не рекомендуется

(рис. 13), частички абразивного материала, используемого в процессе работы, попали на шейки зубчатой пары, что повлекло за собой их повреждение в виде царапин глубиной до 0,04 мкм.

В процессе ремонта царапины шлифовались абразивной шкуркой и проводилось ЭЭЛ шеек с последующим ППД. При этом на шейки вал-шестерни диаметр которой, колебался от 79,87 до 79,88 мм, а твердость после цементации составляла 50 HRC, наносили покрытие методом ЭЭЛ стальным электродом марки 12Х18Н10Т (рис. 13, а) и проводили обкатку роликом.

На шейку зубчатого колеса, диаметр которого колебался от 129,78 до 129,80 мм, а твердость составляла 180-190 НВ, наносили покрытие методом ЭЭЛ электродом из твердого сплава марки Т15К6 и проводили обкатку роликом.

Следует отметить, что после ЭЭЛ и ППД твердость подшипниковых шеек вал-шестерни не изменилась и составляла 50 HRC, а шеек зубчатого колеса увеличилась до 230 НВ.

Мультипликатор установлен между электродвигателем и корпусом низкого давления компрессора природного газа 22ЦКО-42/8-38М1 цеха «Метанол» на ОАО НАК «АЗОТ».



Рис. 12. Ремонт ротора турбокомпрессора ГТТ – 3 методом ЭЭЛ (а) с последующим ППД (б)



Рис. 13. ЭЭЛ подшипниковых шеек вал шестерни (а) и ППД подшипниковой шейки зубчатого колеса (б)

Выводы:

1. Эффективность ППД как метода снижения уровня шероховатости поверхности зависит от удельного усилия обкатки и способа ЭЭЛ.

2. Найденны зависимости твердости поверхностных слоев от удельного усилия деформации, которое рассчитано по геометрическим параметрам очага деформации, определенным на основании анализа напряженно-деформированного состояния при ППД.

3. Согласно зависимости $H_{\mu} = f(P_{cp})$ получено, что рациональными удельными усилиями ППД являются 1000 МПа для алмазного выглаживания и 1500 МПа для обкатки шариком.

4. Выявлено, что наиболее эффективно ППД, с точки зрения деформационного упрочнения, при уменьшении исходной твердости зоны термического влияния или наличии мягкого подслоя после ЭЭЛ.

5. Для обобщения и упрощения выбора наиболее рационального усилия деформации предлагается все электроэрозионные покрытия, в зависимости от микротвердости упрочняемого участка покрытия, разбить на три группы: мягкие (<2000 МПа), средние (2000 - 3000 МПа) и твердые (>3000 МПа).

Для мягких покрытий рекомендуются удельные усилия деформации $P_{cp} = 750 - 1250$ МПа, средних - 1300 - 1500 МПа и твердых - 2500 - 3000 МПа.

Мягкие покрытия рекомендуется упрочнять ОШ. Покрытия средней твердости и твердые можно упрочнять как ОШ, так и АВ, учитывая то, что шероховатость (R_a) исходной поверхности не должна превышать 12 мкм для ОШ и 5 мкм для АВ.

Список литературы:

1. Электроискровое легирование металлических поверхностей / Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Парканский Н.Я., Ревутский В.М. – Кишинев: Штинца, 1985. – 196 с.

2. Эдигаров В.Р., Килунин И.Ю., Дегтярь В.В. Классификация комбинированных методов обработки на основе электрохимического упрочнения // Современные наукоемкие технологии. – 2012. – № 3. – С. 32-35.

3. Хворостухин А.А. Обработка металлопокрытий выглаживанием. – М.: Машиностроение, 1980. – 64 с.

4. Романенко Д.Н. Оценка качества поверхности электроискрового покрытия после выглаживания минералокерамикой / Д.Н. Романенко // Инновационные технологии и оборудование машиностроительного комплекса: межвуз. сб. науч. тр. – Воронеж. – Вып. 10. – С.62-65.

5. Тарельник В.Б. Управление качеством поверхностных слоев деталей комбинированным электроэрозионным легированием. – Сумы.: Изд-во «МақДен», 2002. – 323 с.

6. Способ цементации стальных деталей электроэрозионным легированием. Пат. 2337796. Российская Федерация. МПК В 23Н 9/00 / Марцинковский В.С., Тарельник В.Б., Белоус А.В.; Заявл. 05.10.2006; Опубл. 10.04. 2008, Бюл. № 31. – 3с.

7. Спосіб цементації сталевих деталей електроерозійним легуванням: Пат. 66993. Україна. МПК (2011); В23Н 9/00 / Марцинковский В.С., Тарельник В.Б., Братущак М.П.; Опубл. 25.01.2012, Бюл. № 2. – 4 с.

8. Тарельник В.Б. Современные методы формообразования поверхностей трения деталей машин: Монография / Тарельник В.Б., Марцинковский В.С., Антошевский Б. – Сумы: Издательство «МақДен», 2012. – 280 с.