

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ ЦЕМЕНТОВАННЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ИЗ СТАЛИ 13Х3НВМ2Ф-Ш

С.А. Пахомова
М.Ю. Рыжова

mgtu-mt8@yandex.ru
mgtu-mt8@yandex.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Приведены результаты исследований, выполненных в целях повышения работоспособности высоконагруженных зубчатых колес из теплостойкой цементованной стали 13Х3НВМ2Ф-Ш. Выявлены основные закономерности изменения субструктуры и свойств поверхности, определяющих контактную выносливость и другие эксплуатационные свойства. Предложены рекомендации по выбору режимов диффузионного насыщения для обеспечения износостойкости, контактной выносливости, изгибной прочности. Показано, что эффективность дробеударной обработки теплостойкой стали проявляется после проведения дополнительного низкотемпературного отпуска

Ключевые слова

Зубчатые колеса, теплостойкая сталь, деформационное упрочнение, газовая цементация, твердость, контактная выносливость

Поступила в редакцию 28.12.2016
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Введение. Для авиационных зубчатых колес широко применяют легированные цементуемые стали [1, 2]. Кроме сталей разной теплостойкости 12Х2Н4А и 16Х3НВФМБ-Ш, применяют сложнолегированную сталь 13Х3НВМ2Ф-Ш, которую для обеспечения высокой теплостойкости упрочняют до вторичной твердости [3]. В целях повышения работоспособности цементованные зубчатые колеса после шлифования подвергают поверхностному пластическому деформированию (ППД) [4]. Высокими свойствами также обладают детали и после электро-механической обработки [5, 6].

В настоящее время выбор режимов дробеударного упрочнения основан на получении высоких значений характеристик качества — максимальных глубины и степени упрочнения, остаточных напряжений сжатия, минимальной шероховатости поверхности. Однако после ППД контактная выносливость сталей, обрабатываемых до первичной твердости, определяется структурными изменениями цементованного слоя [5, 7, 8]. Вместе с тем исходное состояние мартенсита сталей, обрабатываемых до первичной и вторичной твердости, различно, и это следует учитывать при разработке технологии комбинированного упрочнения. Поэтому для установления рациональных режимов деформационного упрочнения были изучены особенности изменения структуры и свойств стали 13Х3НВМ2Ф-Ш после обработки до вторичной твердости в сравнении со сталями, обрабатываемыми до первичной твердости.

Методика и объекты исследования. Химико-термическую обработку объектов исследования проводили в заводских условиях по технологии изготовления зубчатых колес. Химический состав стали 13ХЗНВМ2Ф-Ш по массе следующий: 0,09...0,16 % С, 0,17...0,37 % Si, 0,3...0,7 % Mn, 2,4...3,3 % Cr, 0,8...1,2 % Ni, 1,0...1,4 % W, 0,60...0,85 % V, 1,4...2,3 % Mo.

Сталь 13ХЗНВМ2Ф-Ш подвергали цементации при $t = 1050$ °С в течение 2,5 ч, непосредственной закалке в масло и пятикратному отпуску при $t = 530$ °С с выдержкой по 1 ч. После этого толщина диффузионного слоя составляла 1,0...1,2 мм, концентрация углерода на глубине 0,2 мм от поверхности 0,9...1,1 %, твердость на поверхности HRC 58...61, в сердцевине HRC 38...42. Структура цементованного слоя представляла собой мартенсит отпуска без избыточных карбидов при незначительном (менее 5 %) количестве остаточного аустенита.

Были опробованы три способа деформационной обработки: пневмодробеструйное упрочнение (ПДУ), гидродробеструйное упрочнение (ГДУ) и упрочнение микрошариками (УМШ), параметры которых приведены в табл. 1. Переменный параметр — время упрочнения $\tau_{эл}$ — относили к элементу поверхности образца или детали, подвергаемой эффективным ударам дроби. После упрочняющей обработки для улучшения микрогеометрии поверхности проводили виброшлифование (ВШ) на установке ВУРБ-250 в закрепленном состоянии в течение 2 ч.

Таблица 1

Параметры дробеструйной обработки

Вид упрочнения	Диаметр дроби, мм	Расход дроби, Н/мин	Давление воздуха или жидкости, МПа	Расстояние от сопла до детали, мм	Частота вращения детали, об/мин
ПДУ	0,6...1,0	90 + 10	0,4 + 0,2	180 + 10	4
ГДУ	1,4...1,8	300 + 50	0,55 + 0,2	180 + 10	40
УМШ	0,16...0,20	180 + 20	–	180 + 10	12

Изменение тонкой структуры при упрочнении оценивали по ширине рентгеновской линии мартенсита (220). Рентгенограммы снимали на дифрактометре ДРОН-1 в железном $K\alpha$ -излучении в одном и том же месте поверхности до и после наклепа не менее 5–8 раз и вычисляли разность $\Delta\beta = \beta_{исх} - \beta_{нак}$ ($\beta_{исх}$ и $\beta_{нак}$ — физическое уширение рентгеновской линии в исходном состоянии и после наклепа).

Степень и глубину упрочнения определяли по изменению микротвердости поверхностного слоя. Остаточные напряжения измеряли на кольцевых образцах ($D_{нар} = 30,2$ мм, $D_{внутр} = 26$ мм, $b = 10$ мм), тензометрируя деформацию кольца при непрерывном травлении, шероховатость поверхности — на профилографе-профилометре завода «Калибр».

Контактную выносливость определяли на двухконтактной роликовой машине Ш-17 (размеры ролика: $D_{нар} = 30,2$ мм, $D_{внутр} = 12$ мм, $b = 12$ мм) при удельном скольжении 6,5 % и температуре масла (типа 36/1-КУ) 120 °С.

Проведение экспериментов и их обсуждение. Дробеударное упрочнение существенно повышает твердость поверхностного слоя стали 13ХЗНВМ2Ф-Ш, создает высокие напряжения сжатия, изменяет микрогеометрию поверхности. Поскольку параметры обработки при этом различны, то изменение характеристик качества для каждого способа имеет некоторые особенности.

Глубина упрочнения и распространения остаточных напряжений растет с увеличением диаметра дроби, а степень упрочнения — с увеличением ее скорости. Отражением этих закономерностей служат кривые распределения микротвердости и остаточных напряжений (рис. 1 и 2).

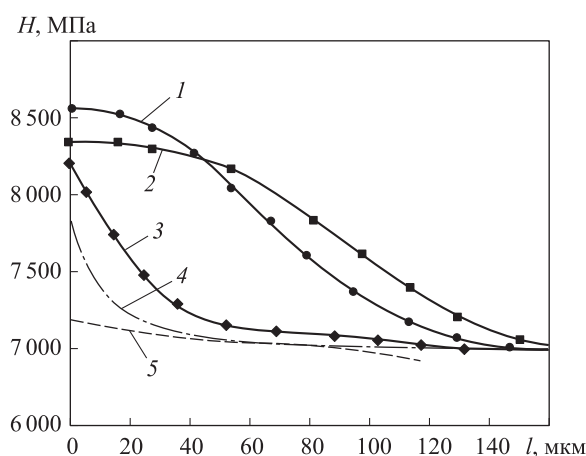


Рис. 1. Распределение микротвердости в поверхностном слое:

1 — ПДУ ($\tau_{эл} = 2$ мин) + ВШ; 2 — ГДУ ($\tau_{эл} = 1$ мин) + ВШ; 3 — УМШ ($\tau_{эл} = 1$ мин) + ВШ; 4 — УМШ ($\tau_{эл} = 1$ мин); 5 — до наклепа

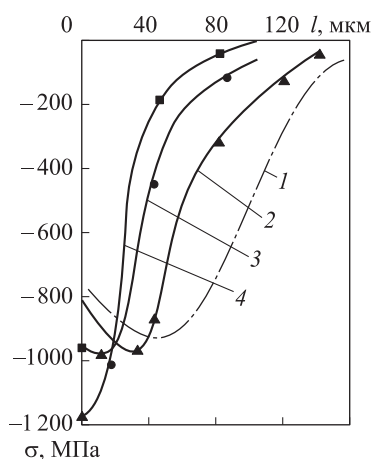


Рис. 2. Эпюры тангенциальных остаточных напряжений в поверхностном слое:

1 — ГДУ ($\tau_{эл} = 3$ мин) + ВШ; 2 — ПДУ ($\tau_{эл} = 2$ мин) + ВШ; 3 — УМШ ($\tau_{эл} = 1$ мин) + ВШ; 4 — УМШ ($\tau_{эл} = 1$ мин)

Малый диаметр частиц и высокая скорость их полета при УМШ обуславливают значительный градиент твердости в тонком поверхностном слое и отсутствие подслоного максимума остаточных напряжений. Виброшлифование, которое вызывает небольшую дополнительную деформацию, способствует обра-

зованию подслоного максимума и увеличивает глубину распространения напряжений.

При ПДУ и ГДУ твердость и остаточные напряжения меняются практически идентично, так как диаметр и скорость дробы для этих способов достаточно близки.

Пневмодробеструйное упрочнение и особенно УМШ увеличивают шероховатость поверхности, микронеровности приобретают острые выступы и впадины. При ГДУ с применением СОЖ и шариков от подшипников, имеющих небольшую скорость полета, шероховатость поверхности несколько уменьшается; снижение параметра Ra примерно в 1,5 раза сопровождается сглаживанием микронеровностей и увеличением радиусов их выступов и впадин. После виброшлифования микропрофиль поверхности качественно и количественно улучшается, влияние способа упрочнения становится практически незаметным.

Несмотря на улучшение характеристик качества поверхностного слоя, контактная выносливость стали 13ХЗНВМ2Ф-Ш после деформационного упрочнения повышается незначительно (табл. 2). В то же время наклеп дробью сталей 12Х2Н4А, 12Х2НВФА, обрабатываемых до первичной твердости, при рациональных режимах упрочнения приводит к заметному росту контактной выносливости [5].

Таблица 2

Свойства стали 13ХЗНВМ2Ф-Ш после наклепа дробью и отпуска

Показатель	Шлифование	Наклеп дробью ($\tau_{эл} = 2$ мин) + ВШ	Наклеп дробью ($\tau_{эл} = 2$ мин) + ВШ и отпуск 2 ч при температуре t , °С				
			200	250	300	400	500
Контактная выносливость, 10^{-6} циклов	6,1	8,1	14,8	17,0	8,6	19,6	–

Примечание. Контактную выносливость определяли после ПДУ; выносливость при изгибе — после ГДУ; $\sigma_{z \max} = 2000$ МПа.

В исходном состоянии мартенсит сталей, обрабатываемых до первичной твердости, характеризуется неоднородностью твердого раствора, большими микроискажениями кристаллической решетки и, как следствие, сильным размытием рентгеновских интерференционных линий.

При деформации такого мартенсита развиваются противоположные процессы: с одной стороны, — увеличение плотности дефектов, с другой, — уменьшение тетрагональности мартенсита и микроискажений кристаллической решетки под влиянием пластической деформации и локального нагрева тонкого поверхностного слоя. В результате при определенных режимах упрочнения, которым соответствует минимальная ширина рентгеновской линии (например, для ПДУ $\tau_{эл} = 2$ мин или кинетическая энергия дробы $E \approx 40$ кДж/м²), формируется структура с пониженным уровнем микроискажений, имеющая более высокое сопротивление развитию микропластической деформации и контактной усталости.

Режимы упрочнения ($\tau_{эл} > 2$ мин), увеличивающие микроискажения ($\Delta\beta$ возрастает по сравнению с минимальным значением), практически не меняют или уменьшают контактную выносливость, несмотря на более значительный рост твердости и напряжений сжатия. При этом упрочнение с $E \approx 40$ кДж/м² сопровождается увеличением контактной выносливости при всех рассматриваемых способах наклепа. Однако степень повышения долговечности неодинакова из-за различия в характеристиках качества поверхности. Так, меньшая эффективность УМШ связана с небольшой глубиной упрочнения, а также интенсивным уменьшением твердости и остаточных напряжений в тонком поверхностном слое. Идентичный характер изменения твердости и остаточных напряжений при ПДУ и ГДУ определяет примерно одинаковое повышение долговечности при этих способах наклепа.

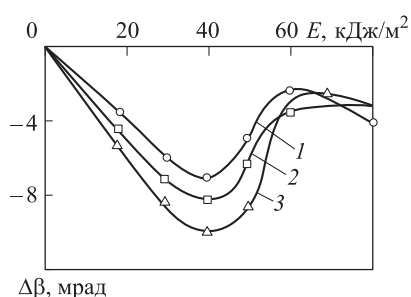


Рис. 3. Зависимость физического уширения линии (220) от времени упрочнения:

1 — ГДУ; 2 — ПДУ; 3 — УМШ

сопротивлению возникновению и развитию трещин усталости. После ПДУ контактная выносливость повышается примерно на 30 %, что, по-видимому, обусловлено уменьшением шероховатости поверхности при виброшлифовании.

Эффективным способом улучшения структуры и повышения контактной выносливости поверхности упрочненных сталей является применение последеформационного нагрева — отпуска (старения) при температурах ниже температуры послезакалочного отпуска [11–13]. Отпуск при рациональных режимах стали 13Х3НВМ2Ф-Ш заметно снижает микроискажения кристаллической решетки, о чем свидетельствует уменьшение ширины рентгеновской линии (рис. 4) при сохранении высокой твердости поверхности и некотором снижении (примерно на 20 %) остаточных макронапряжений.

В сталях, обрабатываемых на первичную твердость, при низкотемпературном отпуске на процесс снятия микроискажений накладывается деформаци-

онный рост микроискажений (рис. 3). Отсутствие режимов, при которых улучшение характеристик качества сопровождается благоприятным изменением структуры этой стали, отрицательно сказывается на ее

сопротивлению возникновению и развитию трещин усталости. После ПДУ контактная выносливость повышается примерно на 30 %, что, по-видимому, обусловлено уменьшением шероховатости поверхности при виброшлифовании.

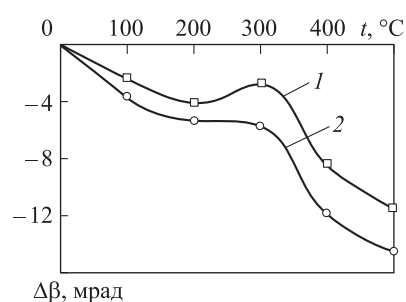


Рис. 4. Зависимость физического уширения линии (220) мартенсита от температуры отпуска:

1 — ПДУ; 2 — УМШ

сионное старение, которое состоит во взаимодействии атомов углерода с дислокациями и уменьшении их подвижности. Формирование более стабильной дислокационной структуры мартенсита при комбинированном упрочнении, включающем в себя наклеп дробью и отпуск, затрудняет процесс накопления микропластической деформации и образования первичных трещин усталости. Рациональная температура отпуска таких сталей на 50...70 °С меньше температуры послезакалочного отпуска ($t = 130...160$ °С).

Нагрев стали 13ХЗНВМ2Ф-Ш до $t = 200...250$ °С также приводит к повышению контактной выносливости (в 1,8–2 раза по сравнению с упрочненным состоянием). При $t = 300$ °С контактная выносливость не увеличивается, что обусловлено развитием более поздних стадий старения, вызывающих рост микроискажений кристаллической решетки (ширина линии несколько увеличивается). Нагрев до $t = 400$ °С после деформации заметно уменьшает микроискажения и тем самым обеспечивает наиболее значительное (в 2,4 раза) повышение контактной выносливости.

Выводы. 1. Эффективность дробеударной обработки зависит от фазового состава цементованного слоя.

2. Эффективность дробеударной обработки для стали 13ХЗНВМ2Ф-Ш проявляется после дополнительного низкотемпературного отпуска при $t = 400$ °С.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пахомова С.А., Макушина М.А., Коваленко С.В. Деформационное упрочнение тяжелонагруженных поверхностей зубчатых передач для горнодобывающей промышленности // Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта. 2016. № 3. С. 243–251.
2. Pakhomoval S.A. The influence of technological heredity, created by thermochemical treatment, on the plastic deformation hardening // 11th Congress of the IFHT. Poster presentations. Proc. 1998. Vol. 3. P. 61–67.
3. Троценко В.Т., Сосновский Л.А. Соппротивление усталости металлов и сплавов: Справочник. Киев: Наукова думка, 1987. 347 с.
4. Пахомова С.А., Рыжов Н.М. Эффективность деформационного упрочнения цементованных сталей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 1999. № 2. С. 61–68.
5. Пахомова С.А., Рыжов Н.М., Васильев В.Р. Изменение субструктуры мартенсита железоникелевых сплавов под воздействием тепловой дробеударной обработки // Металловедение и термическая обработка металлов. 2001. № 11. С. 29–30.
6. Федорова Л.В., Федоров С.К., Бахонов Г.Ю. Упрочняющее электромеханическое восстановление вторичного вала коробки перемены передач автомобиля семейства «Газель» // Ремонт, восстановление, модернизация. 2015. № 9. С. 14–16.
7. Пахомова С.А., Рыжов Н.М. Изменение структуры и свойств мартенсита железоникелевых сплавов при дробеударном упрочнении // Металловедение и термическая обработка металлов. 1990. № 11. С. 23–25.

8. Pakhomova S.A., Unchikova M.V., Fakhurtdinov R.S. Gear wheels surface engineering by deformation hardening and carburization // *Materials Science Forum*. 2016. Vol. 870. P. 383–391. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.870.383
URL: <https://www.scientific.net/MSF.870.383>
9. Пахомова С.А., Унчикова М.В., Каранузов О.Г. Технология комплексного упрочнения тяжело нагруженных поверхностей зубчатых передач // *Проблемы и достижения в инновационных материалах и технологиях машиностроения*. Комсомольск-на-Амуре: Изд-во КГТУ, 2015. С. 205–209.
10. Пахомова С.А., Унчикова М.В. Перспективные методы обучения бакалавров дисциплине «Инженерия поверхности» // *Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта*. 2016. № 3. С. 475–482.
11. Пахомова С.А., Рыжова М.Ю., Фахуртдинов Р.С. Контактная выносливость и износостойкость теплостойкой стали после разных видов цементации // *Вестник научно-технического развития*. 2016. № 9 (109). С. 19–28.
12. Пахомова С.А., Зябрев А.А. Деформационная способность мартенсита цементованного слоя // *Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении*. III Международная научная конференция. М.: Изд-во ИМАШ РАН. 2014. С. 228–230.
13. Морозов А.В., Федорова Л.В., Горев Н.Н., Шамуков Н.И. Исследование влияния режимов сегментной электромеханической закалки на формирование участков регулярной микротвердости // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2016. № 2. С. 24–27.

Пахомова Светлана Альбертовна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Материаловедение» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Рыжова Марина Юрьевна — старший преподаватель кафедры «Материаловедение» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Пахомова С.А., Рыжова М.Ю. Эффективность деформационного упрочнения цементованных зубчатых колес из стали 13X3HBM2Ф-III // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана*. Сер. Машиностроение. 2018. № 1. С. 66–74. DOI: 10.18698/0236-3941-2018-1-66-74

EFFICIENCY OF STRAIN HARDENING OF CARBURIZED GEAR WHEELS FROM STEEL 13X3HBM2Ф-III

S.A. Pakhomova
M.Yu. Ryzhova

mgtu-mt8@yandex.ru
mgtu-mt8@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper shows the results of studies carried out to improve the performance of high-loaded gear wheels from heat-resistant carburized steel 13X3HBM2Ф-III. Within the

Keywords

Gear wheels, heat-resistant steel, strain hardening, gas carburization, hardness, contact fatigue

research we revealed the main regularities of changes in the substructure and surface properties determining contact fatigue and other operational properties. As a result, we give some recommendations on the choice of diffusion saturation regimes for ensuring wear resistance, contact fatigue, bending resistance. Findings of the research show that the efficiency of heat-resistant steel hammering is manifested after additional low-temperature tempering

Received 28.12.2016
© BMSTU, 2018

REFERENCES

- [1] Pakhomova S.A., Makushina M.A., Kovalenko S.V. Deformation hardening of the heavily loaded gear surfaces for the mining industry. *Sovremennyye innovatsionnyye tekhnologii podgotovki inzhenernykh kadrov dlya gornoy promyshlennosti i transporta* [Contemporary Innovation Technique of the Engineering Personnel Training for the Mining and Transport Industry], 2016, no. 3, pp. 243–251 (in Russ.).
- [2] Pakhomova S.A. The influence of technological heredity, created by thermochemical treatment, on the plastic deformation hardening. *11th Congress of the IFHT. Poster presentations. Proc.*, 1998, vol. 3, pp. 61–67.
- [3] Troshchenko V.T., Sosnovskiy L.A. *Soprotivlenie ustalosti metallov i splavov: Spravochnik* [Fatigue resistance of metals and alloys]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1987. 347 p.
- [4] Pakhomova S.A., Ryzhov N.M. Efficiency of the strain hardening of the rose steels. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 1999, no. 2, pp. 61–68 (in Russ.).
- [5] Pakhomova S.A., Ryzhov N.M., Vasil'ev V.R. The variation of martensite substructure of iron nickel alloys under heat shot peening treatment. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2001, no. 11, pp. 29–30 (in Russ.).
- [6] Fedorova L.V., Fedorov S.K., Bokhonov G.Yu. Strengthening electromechanical recondition of gearbox main-shaft for «Gazel» family automobiles. *Remont, vosstanovlenie, modernizatsiya* [Repair, Reconditioning, Modernization], 2015, no. 9, pp. 14–16 (in Russ.).
- [7] Pakhomova S.A., Ryzhov N.M. Change of material structure and properties iron-nickel alloy martensite under heat shot peening hardening. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 1990, no. 11, pp. 23–25 (in Russ.).
- [8] Pakhomova S.A., Unchikova M.V., Fakhurtdinov R.S. Gear wheels surface engineering by deformation hardening and carburization. *Materials Science Forum*, 2016, vol. 870, pp. 383–391. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.870.383 Available at: <https://www.scientific.net/MSF.870.383>
- [9] Pakhomova S.A., Unchikova M.V., Karapuzov O.G. Tekhnologiya kompleksnogo uprochneniya tyazhelonagruzhennykh poverkhnostey zubchatykh peredach. *Problemy i dostizheniya v innovatsionnykh materialakh i tekhnologiyakh mashinostroeniya* [Complex hardening technology of gears heavy-loaded surfaces. Problems and achievements in innovative materials and technologies of mechanical engineering]. Komsomol'sk-na-Amure, KGTU Publ., 2015, pp. 205–209.
- [10] Pakhomova S.A., Unchikova M.V. Advanced methods of teaching bachelors of course "Surface Engineering". *Sovremennyye innovatsionnyye tekhnologii podgotovki inzhenernykh kadrov dlya gornoy promyshlennosti i transporta* [Contemporary Innovation Technique of the Engineering Personnel Training for the Mining and Transport Industry], 2016, no. 3, pp. 475–482 (in Russ.).

[11] Pakhomova S.A., Ryzhova M.Yu., Fakhurtdinov R.S. Contact fatigue and wear resistance of heat-resistant steel after different kinds of carburizing. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya*, 2016, no. 9 (109), pp. 19–28 (in Russ.).

[12] Pakhomova S.A., Zyabrev A.A. Martensite deformation capacity of case-hardened layer. *Fundamental'nye issledovaniya i innovatsionnye tekhnologii v mashinostroenii. III Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya* [Fundamental Investigations and Innovative Technologies in Mechanical Engineering. III Int. sci. conf.]. Moscow, IMASh RAN Publ., 2014, pp. 228–230 (in Russ.).

[13] Morozov A.V., Fedorova L.V., Gorev N.N., Shamukov N.I. A study on the effect of the segment of electromechanical hardening to form a regular plot microhardness. *Sbornik v mashinostroenii, priborostroenii* [Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making], 2016, no. 2, pp. 24–27.

Pakhomova S.A. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Materials Engineering, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Ryzhova M.Yu. — Assist. Professor, Department of Materials Engineering, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Pakhomova S.A., Ryzhova M.Yu. Efficiency of Strain Hardening of Carburized Gear Wheels From Steel 13X3HBM2Ф-III. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2018, no. 1, pp. 66–74 (in Russ.).

DOI: 10.18698/0236-3941-2018-1-66-74