

Розвиток досліджень і практичних розробок передбачається в побудові і дослідженні математичної моделі спіралі, для оцінки завадостійкості інформаційних каналів контролю, розробці структур систем автоматичного керування і алгоритмів визначення параметрів продуктивності по пісках і технічного стану електромеханічної системи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Автоматизация обогатительных фабрик / Г.А.Хан, В.П.Картушин, Л.В.Сорокер и др. – М.: Недра, 1974. – 280с.
2. Тихонов О.Н. Автоматизация производственных процессов на обогатительных фабриках/ О.Н.Тихонов. – М.: Недра, 1985. – 272с.
3. Бабець Є.К. Дослідження інформативності параметрів збагачення руди при побудові інтелектуальних систем управління / Є.К. Бабець, В.П. Хорольський, В.Б. Хоцкіна // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг. – 2006. - №13. – с. 55-59.
4. Хоцкіна В.Б. Автоматизація процесів керування технологічним комплексом збагачення залізних руд з використанням моделей мереж Петрі / В.Б. Хоцкіна // Вісник Криворізького національного університету. – Кривий Ріг, - 231. - №34, - с. 15-18.
5. Дмитриев В.И. Экспериментальные методы оценки производительности по рециркулу в замкнутых циклах измельчения. / В.И. Дмитриев. с. 160-169. // Матеріали міжнар. конф., 3- вересня – 3 жовтня, 2015р. - Дніпропетровськ / - Д.: Національний гірничий університет, 2015. – Т.3. – 252с.
6. Маслов Г.С. Расчеты колебаний валов. / Г.С. Маслов – М.: Машиностроение, 1980. – 151с.
7. Бизерман В.Л. Теория механических колебаний. / В.Л. Бизерман – М.: Высшая школа, 1980. – 408с.
8. Корсун В.И. Идентификация динамических характеристик спирали классификатора и их практическая проверка / В.И. Корсун, А.Н. Марюта, В.И. Дмитриев // Автоматический контроль и управление в цветной металлургии. Тезисы докладов РНТС. – Ташкент, 1983. – С. 28–28.
9. Дмитриев В.И. А.С. 1269838 СССР, МКИ В 03 В 13/00. Способ определения производительности спирального классификатора по пескам / В.И. Дмитриев // №3904014/22-03; Заявлено 27.05.85; Опубликовано 15.11.86. Бюл. №42. // Открытия. Изобретения. – 1986. - №42 – С.82.

УДК 621.787

ПОВЫШЕНИЕ КОНТАКТНОЙ ВЫНОСЛИВОСТИ ШЕСТЕРЕН ДЛЯ ГОРНЫХ МАШИН

С.Д. Карпухин¹, Н.А. Юшин²

¹ кандидат технических наук, доцент, e-mail: mgtu-gvi@yandex.ru

² студент, e-mail: dr.mgtu@yandex.ru

^{1, 2} кафедра «Материаловедение», Московский Государственный Технический Университет им. Н. Э. Баумана, Россия



Аннотация. Повышение работоспособности высоконагруженных деталей, в том числе и шестерен для горных машин возможно путем применения хромоникелевых цементованных сталей с последующим деформационным упрочнением. В работе показано, что для деталей из стали 12Х2Н4А необходимо после дробеударной обработки провести низкий отпуск. Такая обработка приводит к значительному повышению контактной выносливости высоконагруженных шестерен.

Ключевые слова: горные машины, шестерни, сталь 12Х2Н4А, газовая цементация, контактная выносливость, дробеударная обработка.

INCREASING THE CONTACT FATIGUE OF DETAILS FOR MINING MACHINERY

S.D. Karpukhin¹, N. Yushin²

¹Ph.D., assistant Professor, e-mail: mgtu-gvi@yandex.ru

²student, e-mail: dr.mgtu@yandex.ru

^{1, 2} Bauman Moscow State Technical University, Materials Department, Russia

Abstract. Improving performance of highly loaded parts, including gear wheels for mining machinery is possible through the use of chromium-nickel steel. After carburizing them can hold a deformation hardening. It is shown that parts of steel 12Kh2N4A necessary to conduct low tempering after shot blast treatment. Such complex treatment leads to a significant increase in the contact fatigue of highly loaded gears.

Keywords: mining machinery, gear wheels, steel 12Kh2N4A, gas carburizing, contact fatigue, shot blast treatment.

Введение. Для повышения работоспособности зубчатые колеса подвергают комплексному упрочнению, включающему химико-термическую обработку (цементацию) и поверхностное пластическое деформирование. Холодная пластическая деформация существенно меняет строение фаз цементованного слоя, что оказывает определяющее влияние как на характеристики качества поверхностного слоя, так и на важнейшее эксплуатационное свойство зубчатых колес – контактную выносливость [1-3]. Среди современных упрочняющих технологий, обеспечивающих требуемые эксплуатационные характеристики, широко известны методы электромеханической обработки [13]. Тем не менее центральное место принадлежит химико-термической обработке [4, 5, 12].

Целью настоящей **работы** являлось исследование закономерностей изменения характеристик качества цементованного слоя, тонкой структуры его фаз при дробеструйном наклепе и их взаимосвязь с контактной выносливостью хромоникелевой стали 12Х2Н4А. А также возможность повышения эксплуатационных свойств тяжело нагруженных шестерен.



Методика и объекты исследования. Объектами исследований служили роликовые образцы из стали 12Х2Н4А с наружным диаметром 30,2 и шириной 18 мм. Образцы проходили типичную для зубчатых колес химико-термическую обработку (цементацию в шахтной печи при $t = 930^\circ\text{C}$ на глубину 1,0...1,2 мм, отпуск при $t = 650^\circ\text{C}$, закалку в масле от $t = 780^\circ\text{C}$, обработку холодом при $t = -70^\circ\text{C}$, низкий отпуск при $t = 180^\circ\text{C}$) и имели твердость поверхности HRC 61...62, в сердцевине HRC 35...39,5.

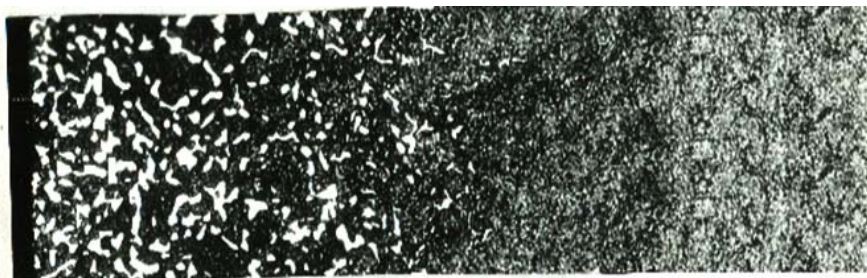
После шлифования по наружной поверхности (снимали припуск 0,15 мм) роликовые образцы подвергали упрочнению стальной дробью диаметром 0,8...1,0 мм при расходе 9 ± 1 кг/мин и давлении воздуха $0,4 \pm 0,2$ МПа.

Контактную выносливость определяли при испытаниях образцов по схеме качения с проскальзыванием (ГОСТ 25.501 – 78). За критерий долговечности стали 12Х2Н4А принимали число циклов до появления на поверхности роликового образца выкрашивания размером не менее ширины рабочей дорожки, равной 8 мм. В качестве смазывающего вещества применяли синтетическое масло диэфирного типа, нагретое до $t = 110 \pm 5^\circ\text{C}$.

На роликовых образцах определяли также распределение микротвердости, тангенциальные остаточные макронапряжения и структуру поверхностного слоя. Остаточные напряжения оценивали по методу Н. Н. Давиденкова на вырезанных из роликов кольцевых образцах с толщиной стенки 2 мм.

Структуру цементованного слоя образцов стали 12Х2Н4А исследовали методами рентгеноструктурного анализа и дифракционной электронной микроскопии. Ширину интерференционных линий (220) и (211) мартенсита определяли на дифрактометре ДРОН-1 в железном K_α -излучении. Съемку рентгенограмм проводили на одном и том же участке образца до и после наклепа 5...10 раз и определяли разность $\Delta\beta = \beta_{\text{исх}} - \beta_{\text{нак}}$, где $\beta_{\text{исх}}$ и $\beta_{\text{нак}}$ – физическое уширение рентгеновской линии в исходном состоянии и после наклепа соответственно.

Проведение экспериментов и их обсуждение. Микроисследования показали характерную для цементованных сталей структуру (рис. 1), фазовый состав которой включал: мартенсит отпуск, карбиды и остаточный аустенит. Поверхностное пластическое деформирование заметно меняет состояние поверхностного слоя образцов стали 12Х2Н4А. Степень упрочнения $\delta = (\Delta H / H_{\text{исх}} \cdot 100) \%$ составила 10-15 % и оказалась максимальной при $E \approx 80$ кДж/м². Этот режим обеспечивает также практически предельную толщину упрочненного слоя (около 230 мкм). Режимы с энергией дроби более 80 кДж/м² применять нецелесообразно, так как при этом твердость на поверхности образцов снижается; максимум твердости смещается в подповерхностный слой [6, 7].



x400

Рисунок 1 – Микроструктура поверхности стали 12Х2Н4А после химико-термической обработки

Для упрочненных дробью роликовых образцов из стали 12Х2Н4А характерны высокие значения остаточных напряжений сжатия (рис. 2). Максимальные остаточные напряжения и напряжения у поверхности образцов растут с увеличением кинетической энергии дроби, достигая наибольших значений также при $E \approx 80$ кДж/м².

Наклеп дробью оказывает неоднозначное влияние на контактную выносливость стали 12Х2Н4А (рис. 3). Повышение ее в 1,5 раза по сравнению с контактной выносливостью в исходном (недеформированном) состоянии наблюдается лишь при упрочнении с $E \approx 40$ кДж/м². Режим обработки с $E \approx 80$ кДж/м², в результате которой достигаются наиболее высокие твердость поверхности и остаточные напряжения сжатия, приводит к снижению долговечности стали 12Х2Н4А почти в 2 раза. Таким образом, выбор режимов деформирования материала по характеристикам качества поверхности может привести к отрицательному эффекту.

Отсутствие однозначной связи между контактной выносливостью, микротвердостью и остаточными напряжениями сжатия обусловлено существенными изменениями структуры фаз цементованного слоя стали при поверхностном пластическом деформировании. Решающее влияние на эти изменения оказывает взаимодействие в процессе деформации трех фаз – мартенсита отпуска, остаточного аустенита и включений избыточных карбидов.

В исходном состоянии мартенсит цементованного слоя стали 12Х2Н4А характеризуется неоднородностью, высокими микроискажениями кристаллической решетки [8, 9]. Остаточный аустенит, количество которого, по данным рентгеноструктурного анализа, составляет в стали 12Х2Н4А до деформационного упрочнения 10...17 %, диспергирован [10, 11].

Важная деталь структуры цементованного слоя стали 12Х2Н4А – неоднородно распределенные в мартенситной матрице глобулы избыточных карбидов (около 10-15 %). «Жесткие» недеформирующиеся включения кар-

бидов вызывают локализацию в мартенсите микропластической деформации и, как следствие, формирование высоких локальных микронапряжений, приводящих к более раннему зарождению трещин контактной усталости.

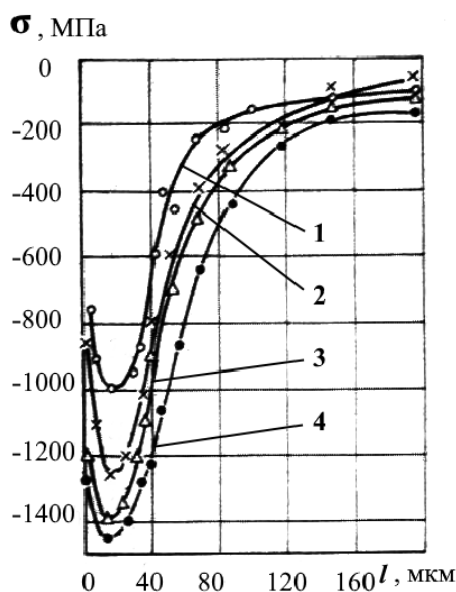


Рисунок 2 – Эпюры тангенциальных остаточных напряжений σ (l – расстояние от поверхности) в образцах из стали 12X2H4A при разной энергии деформирования E , кДж/м²: 1 – 20; 2 – 40; 3 – 60; 4 – 80

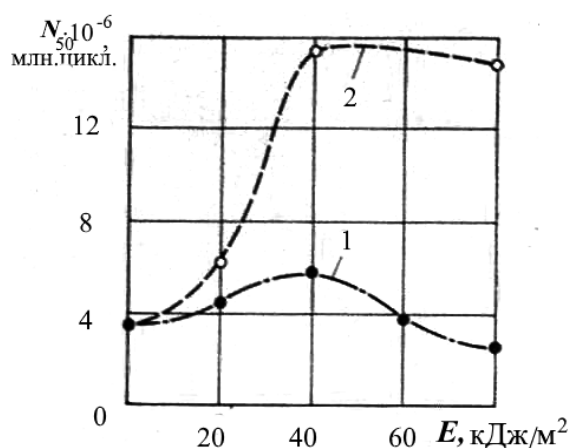


Рисунок 3 – Контактная выносливость N_{50} стали 12X2H4A в зависимости от кинетической энергии дроби E :

1 – наклеп; 2 – наклеп и отпуск при $t = 130^\circ\text{C}$ 2 ч

Значения локальных напряжений около недеформирующихся включений тем больше, чем выше общий уровень микронапряжений в матрице (рис. 4).

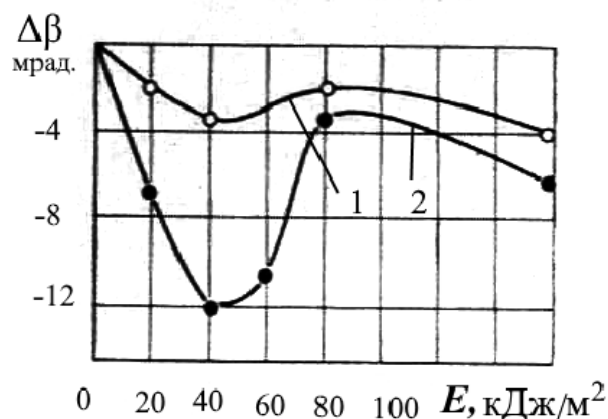


Рисунок 4 – Изменение физического уширения $\Delta\beta$ интерференционных линий:

1 - (211) и 2 - (220) мартенсита в зависимости от кинетической энергии дроби E

Важный резерв повышения контактной выносливости стали 12Х2Н4А – применение после наклепа дробью низкотемпературного отпуска (см. рис. 3, кривая 2). Отпуск при $t = 130^\circ\text{C}$ 2 ч способствует повышению долговечности стали 12Х2Н4А примерно в 3 раза по сравнению с долговечностью в исходном (после шлифования) состоянии. Его положительное влияние связано с уменьшением локальных микронапряжений вблизи структурных концентраторов напряжений, а также с увеличением степени закрепления дислокаций атомами углерода. Значительное повышение долговечности в результате деформационного старения стали 12Х2Н4А в определенной степени связано с совпадением схем напряженного состояния при наклепе и в зоне контактного нагружения. Блокировка дислокаций протекает более интенсивно в системе плоскостей скольжения, близкой к направлению пластического течения металла при контактом нагружении.

Выводы. 1. Повышение контактной выносливости цементованной стали 12Х2Н4А при наклепе дробью достигается в узком диапазоне режимов упрочнения, когда не возникает локальных повреждений тонкой структуры мартенсита цементованного слоя.

2. Поверхностное пластическое деформирование рекомендуется сочетать с последующим низкотемпературным отпуском, необходимым для релаксации локальных микронапряжений, а также для дополнительного упрочнения мартенсита за счет его деформационного старения. В результате такого комбинированного упрочнения контактная выносливость стали 12Х2Н4А повышается в 3 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Елисеев Ю.С., Крымов В.В., Нежурин И.П. и др. Производство зубчатых колес газотурбинных двигателей. М.: Высшая школа, 2001. 493 с.
2. Пахомова С.А. Особенности преподавания курса «инженерия поверхности» студентам по направлению «материаловедение и технологии материалов» // Инженерный вестник. 2015. № 9. С. 19.
3. Пахомова С.А., Макушина М.А., Коваленко С.В. Деформационное упрочнение тяжело нагруженных поверхностей зубчатых передач для горнодобывающей промышленности // Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта. 2016. № 3. С. 243-251.
4. Pakhomova S.A., Ryzhov N.M., Vasil'ev V.R. Changes in the structure of martensite of iron-nickel alloys under the action of thermal shotblast treatment // Metal Science and Heat Treatment. 2001. Т. 43. № 11-12. С. 438-439.
5. Фахуртдинов Р.С., Рыжова М.Ю., Пахомова С.А. Преимущества вакуумной цементации и проблемы ее промышленного применения // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2016. № 8. С. 37-43.
6. Рыжов Н.М., Гуляев А.А., Пахомова С.А. Структура и контактная выносливость цементованной стали 12Х2Н4Ф после поверхностного пластического деформирования // Металловедение и термическая обработка металлов. 1986. № 3. С. 30.
7. Пахомова С.А. Совершенствование технологии поверхностного упрочнения шестерен из высокопрочных сталей // Тяжелое машиностроение. 2009. № 10. С. 35-38.
8. Pakhomova S.A., Unchikova M.V., Fakhurtdinov R.S. Gear wheels surface engineering by deformation hardening and carburization // Solid State Phenomena. 2016. Т. 870. С. 383-391.
9. Рыжов Н.М., Пахомова С.А. Эффективность теплового дробеударного упрочнения цементованных сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. 1994. № 5. С. 21.
10. Пахомова С.А., Рыжов Н.М. Изменение структуры и свойств мартенсита железоникелевых сплавов дробеударном упрочнении / Металловедение и термическая обработка металлов. 1990. № 11. С. 23.
11. Макушина М.А., Климкина А.А., Пахомова С.А. Исследование технологической наследственности разных способов цементации // В сборнике: Будущее науки 2016. Сборник научных статей 4й Международной молодежной научной конференции : в 4х томах. 2016. С. 8689.
12. Пахомова С.А. Эффективность деформационного упрочнения теплостойких сталей // Деформация и разрушение материалов. 2007. № 1. С. 17-20.
13. Морозов А.В., Федорова Л.В., Федотов Г.Д., Толмаков Е.А. Исследование объемного электромеханического дорнования на формирование элементного состава на рабочей поверхности свернутых втулок из Бр. ОЦС 4-4-2,5. / Известия Тул ГТУ. 2016, вып. 1. С. 178-185.