

Рис. 2. Зависимости относительных величин от эксцентриситета e : ▲ – P_0/F_r ; ● – C/C_0 ; ■ – $\bar{\alpha}_0$

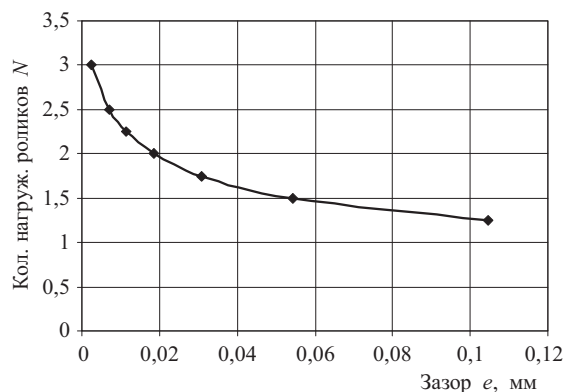


Рис. 3. Зависимость числа нагруженных роликов N от радиального зазора e при $F_r\delta = 0,0261$ мм; $Z = 14$

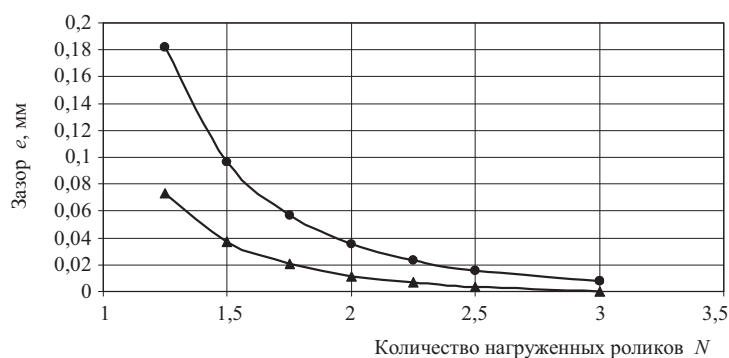


Рис. 4. Зависимость $e - N$ при различных Z : ▲ – $Z = 12$; ● – $Z = 18$; $F_r\delta = 0,0261$ мм

Таким образом, определены параметры роликовых подшипников, которые могут быть использованы при расчете их нагруженности.

Библиографические ссылки

1. Орлов А. В. Влияние износа на работоспособность опор качения // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2007. – № 5. – С. 71–79.
2. Нахатакян Ф. Г. Напряженно-деформированное состояние упругих элементов зубчатых механизмов и сооружений при их линейном и кромочном контакте : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М. : ИМАШ РАН, 2014. – 55 с.

Получено 27.04.2017

3. Решетов Д. Н. Детали машин. – М. : Машиностроение, 1989. – 496 с.
4. Там же.
5. Нахатакян Ф. Г. Податливость роликовых подшипников // Вестник машиностроения. – 2015. – № 2. – С. 19–21.
6. Нахатакян Ф. Г. Сближение упругих тел конечных размеров при начальном касании по линии // Вестник машиностроения. – 2014. – № 2. – С. 24–27.
7. Нахатакян Ф. Г. Решение плоской контактной задачи теории упругости с помощью модели упругого полупространства // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2011. – № 5. – С. 63–67.
8. Орлов А. В. Указ. соч.

УДК 621
DOI 10.22213/2413-1172-2017-2-97-102

Е. И. Тескер, доктор технических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ (ЛО) ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ТРАНСМИССИЙ И ПРИВОДОВ

Одним из наиболее прогрессивных методов упрочнения зубчатых колес из конструкционных сталей является лазерное упрочнение, которое заключается в воздействии интенсивно-

го потока энергии на локальный участок упрочняемой поверхности, подвергаемой в условиях эксплуатации наибольшему износу (предельное состояние детали или узла в целом). При этом оптимальные

условия нагрева и охлаждения упрочняемых поверхностей позволяют формировать уникальные свойства, которые нельзя получить традиционными методами (например, химико-термической обработкой). Известно, что ресурс зубчатых передач лимитируется изгибной и контактной прочностью зубьев.

Одним из главных недостатков традиционных методов упрочнения является необходимость нагрева больших участков или всей детали, в результате чего из-за короблений и деформаций требуется выполнение дорогостоящих доводочных операций, защита неупрочняемых прецезионных поверхностей и т. п. Возникают технологические трудности при обеспечении необходимой точности зубчатых колес, а в ряде случаев упрочнение, например, крупногабаритных зубчатых, колес становится невозможным.

Шлифование зубьев во многих случаях приводит к ухудшению свойств упрочненных деталей из-за прижогов и других дефектов, снижающих сопротивляемость усталостным разрушениям.

Сравнительные испытания показывают, что контактная прочность цементованных зубчатых колес после шлифования снижается в 2-3 раза.

Для реализации неоспоримых преимуществ методов упрочнения высоконагруженных зубчатых колес с использованием лазерного излучения и создания новых технологий изготовления требуется следующее:

- комплексные исследования кинетики и механизма формирования поверхностно упрочненных слоев при лазерном воздействии на конструкционные стали;
- изучение процессов образования усталостных разрушений поверхностно упрочненных структурно неоднородных поверхностных слоев, имеющих градиент свойств по толщине и ширине упрочненной поверхности;
- создание расчетных методов определения зон с максимальным износом с целью последующего их упрочнения в процессе локального лазерного воздействия;
- создание методов расчета на контактную прочность поверхностно упрочненных деталей;
- создание методов расчета и разработка рекомендаций по определению параметров упрочненных слоев, обеспечивающих требуемую сопротивляемость контактным разрушениям.

В настоящей работе приведены результаты исследований фазовых и структурных превращений на рабочих поверхностях зубьев, подвергнутых локальной лазерной обработке непрерывным лазером.

При лазерной закалке, как и при других видах термоупрочнения, на этапе нагрева в поверхностном слое происходит формирование аустенитной структуры, которая при охлаждении превращается в мартенсит. Следует отметить, что при лазерной закалке отсутствует этап выдержки при постоянной температуре, который необходим при объемной термической обработке. Именно этот режим приводит к короблению деталей. После достижения максимальной температуры лазерного нагрева происходит быстрое

охлаждение за счет отвода теплоты во внутренние слои металла. Подводимая тепловая энергия лазерного излучения больше той энергии, которая необходима для перестройки кристаллической решетки. Поэтому структурные превращения при лазерной закалке происходят не изотермически, как при медленном объемном нагревании, а в некотором интервале температур $A_{cl}^{нач} \dots A_{cl}^{кон}$ (рис. 1). В связи с этим окончание аустенитного превращения смещается в область более высоких температур. Высокая скорость нагрева также приводит к тому, что диффузионная перестройка ОЦК-решетки избыточного феррита на ГЦК-решетку аустенита может не успеть закончиться на линии GS диаграммы «железо – углерод». В этом случае точки A_{c3} также смещаются в область более высоких температур. Смещение критических точек зависит не только от скоростей нагрева и охлаждения, но и от химического состава стали, дисперсности исходной структуры, дислокационного строения и т. п.

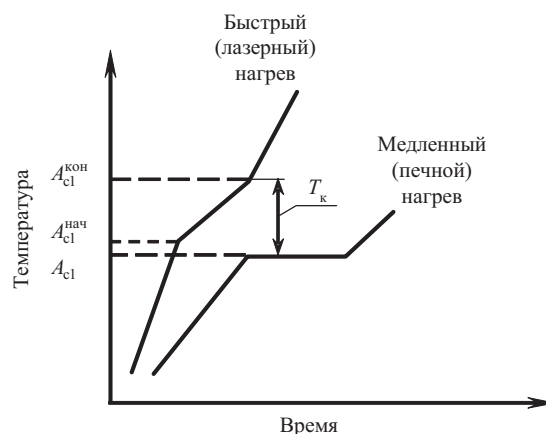


Рис. 1. Схема сдвига критических точек при лазерной обработке

После завершения α - γ -превращения концентрация углерода выравнивается в результате его диффузии из перлитных зерен в ферритные. Выравнивание концентрации углерода (гомогенизация при последующем охлаждении) оказывает решающее влияние на образование в поверхностном слое структуры полной лазерной закалки. Неравномерное распределение температур в зоне лазерного нагрева приводит к структурной неоднородности упрочненного слоя (рис. 2).

Первый внешний слой представляет собой зону оплавления, которая формируется при закалке из расплавленного состояния и имеет столбчатое строение. Кристаллы в этом слое вытянуты в направлении теплоотвода. Основная структурная составляющая — мартенсит. При лазерной закалке без оплавления этот слой отсутствует. Именно такой режим лазерной закалки рекомендуется для упрочнения активных поверхностей зубьев.

Второй слой представляет зону закалки из твердой фазы, верхняя граница которой определяется нагревом выше температуры точки A_{c3} , а нижняя — до

температуры точки A_{c1} . В этом слое происходит как полная, так и неполная закалка; в результате указанный поверхностный слой характеризуется большой структурной неоднородностью. На самой поверхности формируется однородный мартенсит, полученный при охлаждении из области гомогенного аустенита. На внутренней границе упрочненного слоя и основного металла образуются структуры, полученные при охлаждении из негомогенного аустенита. В результате в упрочненном слое наряду с мартенситом выявляются элементы исходной структуры, а именно феррит и перлит.

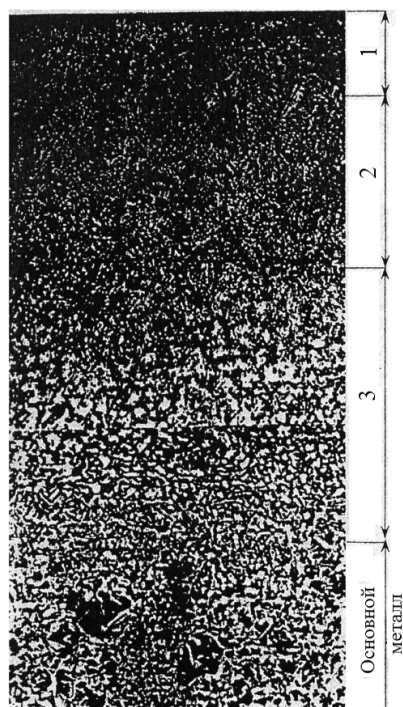


Рис. 2. Структура поверхностного слоя нормализованной стали 40 после лазерной обработки ($\times 100$)

Третий слой представляет собой переходную зону с неоднородной структурой, которая формируется при нагреве металла ниже точки A_{c1} . Второй и третий слои образуют зону термического влияния (ЗТВ), размеры которой увеличиваются при увеличении мощности излучения, снижения скорости обработки и увеличении диаметра лазерного луча.

Исследования показали, что при лазерной обработке формируются структуры с оптимальными свойствами. Достижимое при этом увеличение износостойкости не всегда сопровождается повышением усталостной контактной прочности, следовательно, и долговечности. Это обусловлено тем, что механизмы влияния лазерного упрочнения на износостойкость и усталостную контактную прочность существенно отличаются. Структурная неоднородность стали после лазерного упрочнения приводит к тому, что предел контактной выносливости изменяется не только по толщине, но и по ширине упрочненной полосы. Вследствие структурной неоднородности при циклическом контактом нагружении зубчатых

колес, упрочненных лазером, усталостные разрушения возникают как на поверхности, так и на определенной глубине (подповерхностные разрушения), которые наиболее опасны, так как приводят к быстрому выходу деталей из строя. Опасными зонами металла, в которых наиболее вероятны глубинные разрушения, являются сердцевина металла, а также участки между лазерными дорожками в зоне их перекрытия. Образование зон перекрытия неизбежно при сплошной обработке упрочненной поверхности.

В настоящее время практически отсутствуют исследования условий образования глубинных контактных разрушений зубчатых колес упрочненных лазером, что не позволяет научно обоснованно осуществлять выбор оптимальных параметров лазерной обработки зубчатых колес. Это сдерживает создание и применения эффективных лазерных технологий при изготовлении зубчатых колес.

Ниже приводятся результаты исследований, на основании которых разработана методология проектирования зубчатых колес приводов с лазерной закалкой активных поверхностей зубьев.

Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния при контактом нагружении деталей с упрочненным поверхностным слоем. Выявлены закономерности изменения наибольших эквивалентных касательных напряжений, ответственных за образование глубинных контактных разрушений. Установлено расположение опасных зон с минимальным запасом глубинной контактной прочности. Поскольку внешней характеристикой свойств является твердость упрочненного слоя, были выполнены исследования закономерностей изменения твердости зубьев с расстоянием от поверхности.

Аппроксимацией экспериментальных данных были получены уравнения $H(z)$, позволяющие определять расчетным путем значения твердости в каждой зоне упрочненного слоя:

$$H = \frac{H_{п.л}}{\left(\frac{H_{п.л}}{H_{с.л}} - 1\right) \left(\frac{z}{\delta_{с.л}}\right)^4 + 1}. \quad (1)$$

Здесь $H_{п.л}$ и $H_{с.л}$ – твердость поверхности и сердцевины материала зубьев после лазерного упрочнения; $\delta_{с.л}$ – толщина упрочненного лазером слоя.

Исследованиями доказано, что глубинная контактная прочность обеспечивается при условии

$$n_{\min} \geq [n], \quad (2)$$

где $[n_{\min}]$ – коэффициент запаса, необходимый для предотвращения глубинных контактных разрушений; $[n]$ – допускаемый коэффициент запаса. Ввиду неоднородности свойств упрочненного лазером слоя коэффициент запаса представляет собой функцию $n(z)$, значения которой на любом расстоянии z_i от поверхности контакта определяются по разработанному методу расчета на глубинную циклическую контактную прочность, который включен в ГОСТ 24354.

Предварительные экспериментальные исследования условий образования контактных разрушений зубчатых колес, упрочненных лазером, были выполнены с использованием роликовой модели. Образцы из стали 25ХГТ, наиболее широко применяемой для изготовления зубчатых колес многих машин, подвергали лазерной термической обработке на разных режимах. Ширина одной лазерной дорожки, измеренной на поверхности образца, составляла 2...5 мм, а максимальная толщина упрочненного слоя $\delta_{\text{сmax}} = 0,4...0,8$ мм. Лазерная обработка была финишной операцией. При этом обеспечивалась заданная геометрия и параметры шероховатости зубьев. Часть экспериментов была выполнена на образцах, подвергнутых предварительно химико-термической обработке (цементации) на глубину 1,3-1,5 мм, после чего проводили закалку лазерным излучением. Зоны лазерной обработки схематично показаны на рис. 3. Испытания проводили при напряжениях $\sigma_H = 1500...2500$ МПа на базе $3 \cdot 10^7$ циклов. Перед испытаниями и после них проводили металлографические и рентгеноструктурные исследования, а также измеряли микротвердость по толщине слоя в центре и в зонах перекрытия лазерных дорожек. Расчеты на глубинную контактную прочность выполняли с учетом полученных экспериментальных значений микротвердости. Расчетным путем установлена зона с минимальными значениями функции $n(z)$, которые в зависимости от условий испытаний находились на расстоянии $Z_{n,\text{min}1} = 0,2-0,3$ мм или $Z_{n,\text{min}1} = 0,5-0,6$ мм. На этой же глубине расположены зоны действия наибольших касательных напряжений $Z_{n,\text{min}1} = Z_{\text{max}}$, либо $Z_{n,\text{min}2} > Z_{\text{max}}$. Схемы расположения упрочненных участков зубьев показаны на рис. 3.

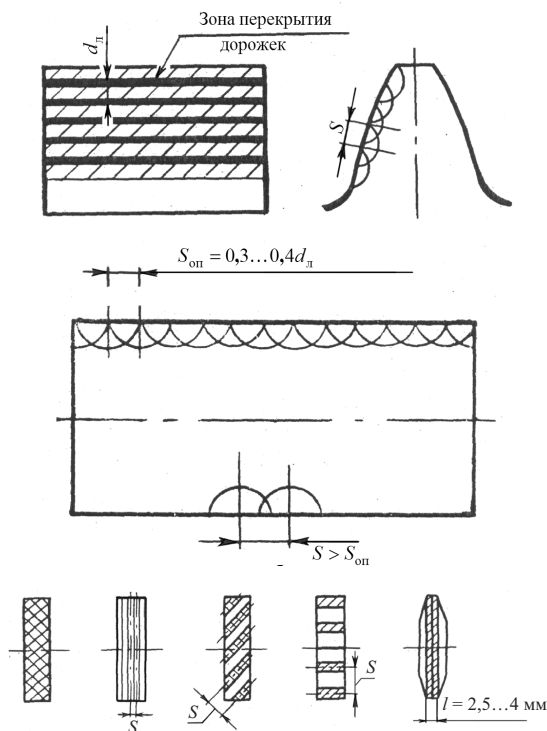


Рис. 3. Схемы расположения зон лазерной обработки поверхности образцов для испытаний

На рис. 4 показаны графики, характеризующие значение микротвердости, полученные при лазерной обработке по различным режимам. Установлено, что при лазерном упрочнении (см. рис. 4, линия 1) значительно (до 40 %) повышается микротвердость части упрочненного слоя, примыкающего к его внешней зоне (приблизительно до толщины 0,4-0,5 мм). У предварительно закаленных образцов (см. рис. 4, кривая 2) наблюдается резкое снижение микротвердости по сравнению с исходной, а затем, за пределами зоны лазерного воздействия, микротвердость сохраняется на уровне исходной. На образцах без предварительной закалки микротвердость плавно снижается до микротвердости исходной структуры. Выявленный характер распределения микротвердости обусловлен микроструктурами, сформированными при локальной обработке лазерным излучением рабочих поверхностей.

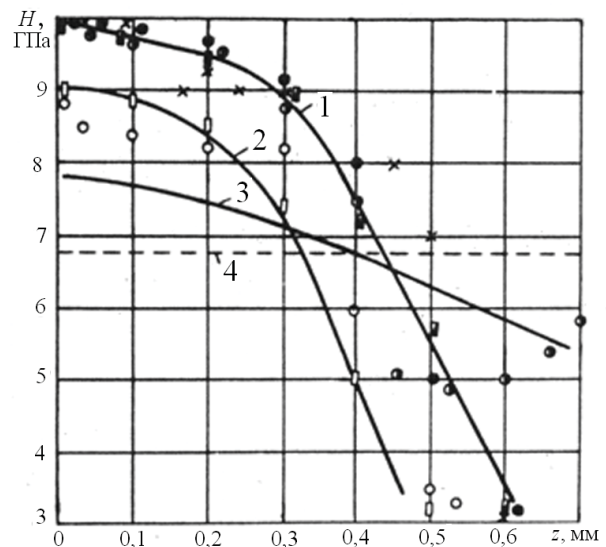


Рис. 4. Распределение микротвердости по толщине упрочненных слоев, полученных различными методами: 1 – цементация, лазерная термическая обработка; 2 – нитроцементация с повышенным азотным потенциалом; 3 – нитроцементация, закалка, низкий отпуск; 4 – закалка ТВЧ

После лазерного упрочнения структура поверхностного слоя предварительно закаленной стали имеет два или три участка с четкими границами (рис. 5). Микроструктура первого слоя максимальной толщиной до 60 мкм с наибольшей микротвердостью $H_{100} = 10000$ МПа состоит из скрытоигольчатого мартенсита, мелкодисперсных карбидов и остаточного аустенита (до 30 %). При сильном травлении выявляется столбчато-дендритное строение зерен аустенита (см. рис. 5, в), что свидетельствует о процессе кристаллизации из жидкого состояния. Рост главных осей дендритов вследствие большой скорости кристаллизации происходит в направлении, перпендикулярном границе раздела микроструктурных зон, совпадающим с направлением теплоотвода. Вблизи поверхности на участках переходной зоны по краям лазерной дорожки наблюдается некоторый разворот осей параллельно поверхности.

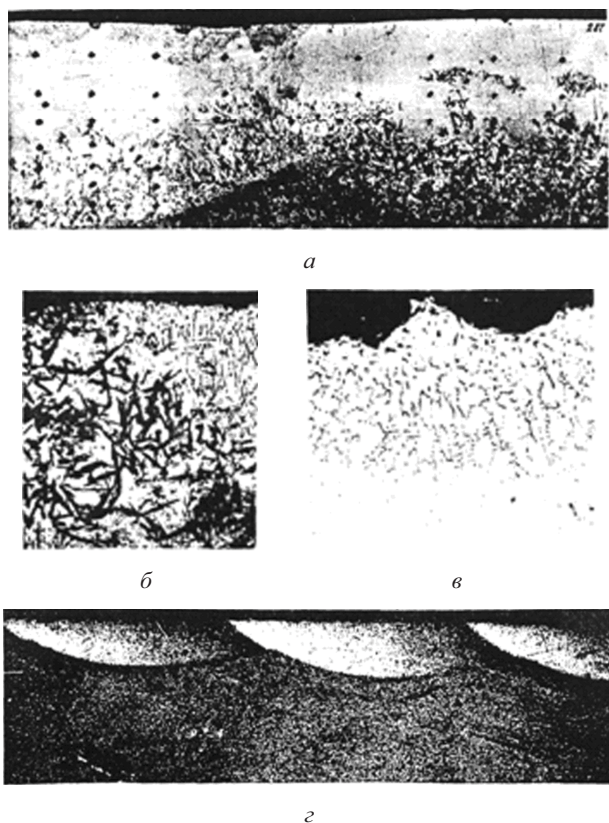


Рис. 5. Микроструктура упрочненной лазером стали (поперечные шлифы) в предварительно закаленном состоянии: а, б, в – различные зоны закаленного слоя; с – расположение лазерных треков при оптимальных режимах упрочнения

Далее располагается зона, структура которой определяется видом предшествующей термической обработки. Для цементованной (нитроцементованной) стали в этой зоне выявляется мелкодисперсная мартенситно-аустенитная структура ($H_{100} = 7800 \dots 8300$ МПа) с равномерно распределенными карбидами. При лазерной обработке происходит интенсивное растворение карбидов с одновременным увеличением концентрации углерода, следовательно, и процентного содержания остаточного аустенита. Третий участок – зона повышенной травимости с троостомартенситной структурой, микротвердость которой составляет 4100...4200 МПа. На границах упрочненных и неупрочненных участков, а также в зонах перекрытия структура мартенситная или сорбитообразная с перистоигльчатыми зёрнами, ориентированными в направлении теплоотвода. Ее твердость составляет 4600 МПа.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что характеристики и расположение структурных зон, а также значения микротвердости отдельных участков определяют характер возникновения поверхностных или глубинных контактных разрушений. Во всех опытах усталостные разрушения возникали в зонах с минимальным значением запаса глубинной контактной прочности, что соответствует расчетным значениям. Глубинные усталостные трещины и разрушения располагались на границах 2-го и 3-го участков вблизи вертикальной

оси симметрии дорожки или в зонах перекрытия дорожек, что приводило к отслаиванию всего упрочненного слоя (рис. 6). Поверхностные контактные разрушения возникали в зонах термического влияния, расположенных на участках перекрытия лазерных дорожек или по их границам (при обработке без перекрытия).

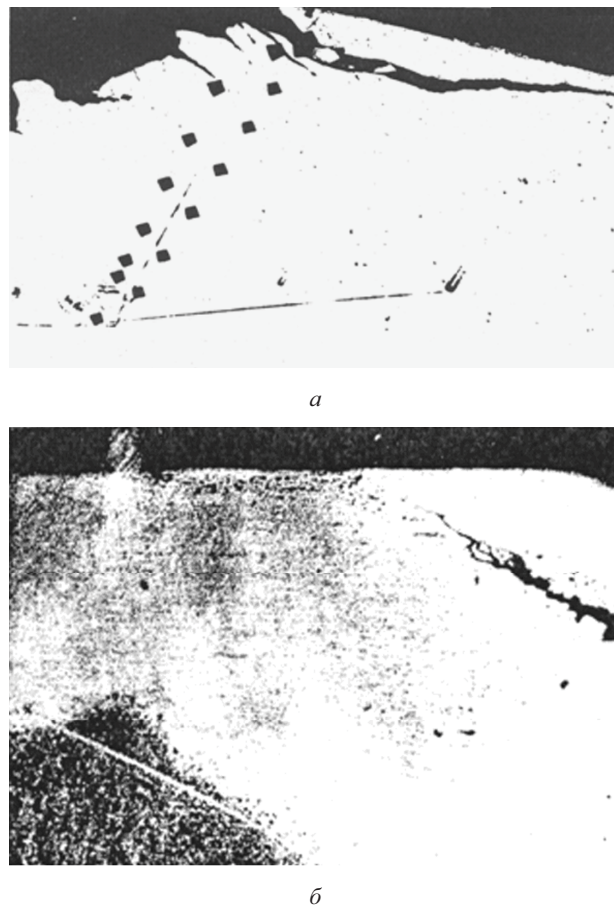


Рис. 6. Усталостные трещины после испытаний: а – поверхностные трещины; б – глубинные трещины ($\times 400$)

Как и при испытаниях предварительно цементованных (нитроцементованных) образцов, глубинные трещины распространялись параллельно поверхности, а поверхностные – под острым углом.

В тех случаях контактного нагружения, когда зона с наибольшими эквивалентными касательными напряжениями располагалась в первом или втором слое с мелкодисперсной мартенситно-аустенитной структурой с микротвердостью $H_{100} > 8000$ МПа, расчетный минимальный запас циклической прочности был наибольшим. Именно эти образцы по результатам испытаний имели высокую износостойкость и наибольшую контактную прочность. Испытания выявили преобладающее влияние на контактную усталостную прочность взаимного расположения лазерных дорожек на поверхности контакта. Установлено, что наибольшую сопротивляемость контактным нагрузкам имели образцы, поверхности которых были обработаны с оптимальным перекрытием лазерных дорожек. Металлографиче-

ские исследования не выявили разрушений поверхностей этих образцов. Полученные результаты позволяют утверждать, что лазерное упрочнение может быть эффективным методом повышения контактной усталостной прочности только в том случае, если обеспечивается глубинная контактная прочность упрочненного слоя. Поверхностная контактная прочность определяется относительным расположением обработанных лазером участков на рабочей поверхности зубчатого колеса.

Необходимые параметры упрочненного слоя и предельные контактные напряжения могут быть найдены с помощью расчетно-теоретической модели глубинного контактного разрушения поверхностно упрочненных деталей [1, 2]. Исходя из физической модели контактного разрушения высокую контактную прочность деталей, упрочненных лазером, можно объяснить особым структурным состоянием поверхностного слоя. Аустенитно-мартенситная структура, обладающая высокой дисперсностью, твердостью и пластичностью, устойчива к упругопластическим деформациям, поэтому процесс накопления упругопластических деформаций в локальных объемах упрочненного лазером металла при циклическом контактом нагружении не приводит к необратимым структурным превращениям и образованию неустойчивых хрупких вторичных структур, например, таких, как неотпущенный мартенсит. Исследованиями поверхностного слоя после испытаний было установле-

Получено 03.05.2017

но, что соотношение объемов структурных фаз и количество остаточного аустенита в поверхностном слое после длительного нагружения практически не изменилось. На повышение контактной прочности существенное влияние оказывает также благоприятное остаточные напряжения сжатия, обусловленные высокими скоростями теплового воздействия.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что лазерное упрочнение является высокоэффективным методом повышения несущей способности высоконагруженных зубчатых колес, трансмиссий и приводов. При испытаниях деталей упрочненных лазером был выявлен эффект самоорганизации поверхностей трения, в результате чего формируется оптимальный микрорельеф, который характеризуется большими радиусами микронеровностей. Такой микрорельеф способствует образованию упругопластической масляной пленки, разделяющей поверхности контакта зубьев, что также благоприятно сказывается на сопротивляемости изнашиванию и разрушениям.

Библиографические ссылки

1. Тескер Е. И. Современные методы расчета и повышения несущей способности поверхностно упрочненных зубчатых передач трансмиссий и приводов. – М.: Машиностроение. 2011. – 434 с.: ил.
2. ГОСТ 21354. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. – М., 1987.

УДК 621.833

DOI 10.22213/2413-1172-2017-2-102-107

В. Е. Антонюк, доктор технических наук, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск
А. М. Гоман, кандидат технических наук, доцент, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск
Н. Н. Ишин, доктор технических наук, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск
М. М. Кане, доктор технических наук, профессор, Белорусский национальный технический университет, Минск
В. В. Комиссаров, кандидат технических наук, доцент, Белорусский государственный университет транспорта, Гомель
А. С. Скороходов, кандидат технических наук, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск
Л. А. Сосновский, доктор технических наук, профессор, ООО «НПО «Трибофатика», Гомель
В. Е. Старжинский, доктор технических наук, Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси, Гомель
Е. И. Тескер, доктор технических наук, Волгоградский государственный технический университет

ПРОБЛЕМЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ В ОБЛАСТИ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ И НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ НОРМАТИВНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Часть 1. Стандартизация в области точности, видов повреждений и изготовления зубчатых передач

Введение

Одной из актуальных проблем в стандартизации зубчатых передач, учитывая современное состояние их производства в разных отраслях машиностроения, является гармонизация национальных стандартов ГОСТ с международными ISO и национальными стандартами зарубежных

стран, в первую очередь немецкими стандартами DIN. С одной стороны, как будет показано ниже, заказ зарубежного зубообрабатывающего оборудования, по техническим требованиям соответствующих ГОСТ, заранее снижает качество их производства, но, с другой стороны, отсутствие в стандартах ГОСТ требований по обеспечению ресурса надежности, работоспо-