

к 5

СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

CONSTRUCTION AND ROAD BUILDING MACHINERY

2-2017



ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ
ЖУРНАЛ

Зарегистрирован
в Комитете РФ по печати.
Reg. № 014898

Входит в перечень рецензируемых журналов,
рекомендованных ВАК РФ

УЧРЕДИТЕЛИ

ЗАО «СТРОЙДОМАШ»
ООО «СДМ-Пресс»
ООО «КОНЦЕРН
СТРОЙИНСТРУМЕНТ»

ИЗДАТЕЛЬ Лицензия ЛР № 071581

ИЗДАТЕЛЬСТВО ТЕХНИЧЕСКОЙ

ЛИТЕРАТУРЫ «СДМ-Пресс»

Генеральный директор

Говоров А.Ю.

Редакционный совет

ГОВОРОВ А.Ю., ГОРБОВЕЦ М.Н.,
ЗОРИН В.А., КОРОБКИН В.А.,
КРАВЧЕНКО И.Н., КУДРЯВЦЕВ Е.М.,
КУЗНЕЦОВА В.Н., ПЛАВЕЛЬСКИЙ Е.П.,
ПРИМАК Л.В., САВЕЛЬЕВ А.Г.,
СМОЛЯНИЦКИЙ Э.А., СТРУК М.В.,
СУШКОВ С.И., ХМАРА Л.А.,
ЩЕРБАКОВ В.Ф.

Тел./факс: (903) 226-00-44,

(905) 732-00-44

E-mail: sdm-press@mail.ru, sdmpress@mail.ru

<http://www.sdmpress.ru>

Компьютерная вёрстка издательства «СДМ-Пресс»

Подписано в печать 22.02.2017.

Формат 60 x 88 1/8.

Бумага мелованная.

Подписаться на журнал можно:

- в РЕДАКЦИИ;
- через ИНТЕРНЕТ (www.sdmpress.ru);
- в любом почтовом отделении по каталогам:
 - агентства «Урал-Пресс»
(индекс журнала 70885)
 - «ГАЗЕТЫ. ЖУРНАЛЫ» агентства
«Роспечать» (индекс журнала 70885)

ЮРИДИЧЕСКУЮ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ
за достоверность информации рекламы
НЕСЁТ РЕКЛАМОДАТЕЛЬ

Внимание! Материал, опубликованный в журнале,
охраняется законом РФ об авторском праве

Выпускающий редактор

БУДАЕВА Е.Г.

© ООО «СДМ-Пресс»,

«Строительные и дорожные машины», 2017

2/2017

СТРОИТЕЛЬНЫЕ
И ДОРОЖНЫЕ
МАШИНЫ

CONSTRUCTION
AND ROAD BUILDING
MACHINERY

Издаётся с января 1956 г.



СОДЕРЖАНИЕ

- 3** Реальная гарантия производителя потребителю: идентификатор продукта, стандарт организации и финансовое поручительство
Иценко В.А., Лидяева Н.И., Помазанов В.В., Шоль Е.И.

ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

- 7** Анализ результатов металлографических исследований зубьев венца опорно-поворотного круга одноковшового экскаватора
Савинкин В.В., Кузнецова В.Н.
- 12** Исследование управляемых ножевых систем землеройно-транспортных машин
Баловнев В.И., Данилов Р.Г., Улитич О.Ю.

ГИДРОПРИВОД

- 16** Анализ и вывод закона торможения отводимых конструкций гидравлического привода
Буренин В.В., Трифонова Г.О., Трифонова О.И., Щербаков В.Ф., Прохницкий А.В.
- 22** Исследование пропорциональных электрогидравлических клапанов
Вязников М.В., Кириллов А.А., Михайлов А.В.

ОБОРУДОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

- 27** Анализ структур и методов управления техническим состоянием технологического оборудования бетонорастворных комплексов
Кравченко И.Н., Чеха О.В., Бумарсков Д.А., Ерофеев М.Н.

ГРУЗОВЫЕ АВТОМОБИЛИ И ТРАКТОРЫ

- 34** Совершенствование методики обработки результатов статистических экспериментальных исследований показателей безотказности системы питания двигателей КамАЗ наземных транспортных средств
Тарасов В.Н., Бояркина И.В.
- 39** Исследование нагрузочных режимов тракторного дизеля при работе на спиртовой эмульсии
Лиханов В.А., Лопатин О.П., Чупраков А.И.

ИССЛЕДОВАНИЯ

- 44** Эффективность разработки и внедрения системы утилизации техники специализированных производств.
Артюх Н.В., Герасимов В.С., Игнатов В.И., Тесовский А.Ю., Шамарин Ю.А.
- 53** Методы оценки прочности дорожных конструкций
Сушков С.И., Бухтояров В.Н.

ИНФОРМАЦИЯ

- 57** Обзор международной СДМ-информации
- 69** Информационный бюллетень цен на СДМ и оборудование

Мнение редакции не всегда совпадает с мнением автора

УДК 621.879.322

Анализ результатов металлографических исследований зубьев венца опорно-поворотного круга одноковшового экскаватора

С целью изучения влияния динамических нагрузок на долговечность и характер износа опорно-поворотного круга экскаватора исследована макро- и микроструктура зубьев его венца на всех стадиях формирования дефекта. Установлено, что разрушение упрочненных шестерен происходит из-за развития контактной усталости, формирующей трещины, развитие которых приводит к миграции и отделению частиц металла.

Ключевые слова: долговечность, структура, усталостные напряжения, металлография.

Несмотря на использование современных технологий при изготовлении и упрочнении материала и поверхности шестерен, в том числе зубчатого венца опорно-поворотного круга рабочей платформы экскаватора, при его эксплуатации наблюдается интенсивный износ, излом зубьев и снижение базовых циклов эксплуатации. На долговечность зубчатого венца поворотного круга рабочей платформы экскаватора существенное влияние оказывает износостойкость контактной поверхности и концентрация внутренних напряжений в области пятна контакта [1]. Сопrotивляемость материала внутренним напряжениям обеспечивают его физико-механические свойства: структура, зернистость, аустенитный и мартенситный класс железа, твердость и микротвердость.

Макроструктура зубчатого венца опорно-поворотного круга характеризуется формой и расположением крупных

кристаллитов (зёрен), наличием и расположением различных дефектов в металле, распределением примесей и неметаллических включений, которые зависят от технологии изготовления и упрочнения. Для выявления физических механизмов протекания процессов пластической деформации и разрушения металлов необходимо провести металлографическое исследование внутренней структуры материала зубьев и границ их излома. Установленные при этом качественные и количественные характеристики позволят спрогнозировать ресурс работы и обосновать способы повышения долговечности опорно-поворотного круга экскаватора.

Исследованию подлежали зубья венца опорно-поворотного круга экскаватора, выполненные из стали 20ХН3А: серия 1 – образцы неповрежденных зубьев венца, предшествующие обломленным; серия 2 – образцы изношенных зубьев, имеющие геометрические изменения, но не обломленные; серия 3 – образцы обломленных зубьев венца поворотного круга; серия 4 – образцы из зубьев, следующих за обломленными.

Комплексная проверка микроструктуры поверхности излома металла и его прочностные характеристики, основанные на фототомографии изломов указанных выше серий образцов, дали следующие результаты.

Образцы серии 1. Пятно контакта на рабочей поверхности зубьев можно оценить косвенным контролем и охарактеризовать как пятно правильной формы относительно проектной оси зуба. Материал зубьев венца с целью повышения контактной выносливости и прочности на изгиб подвержен цементации и закалке на толщину 0,6–0,8 мм. При этом твердость HRC составит более 55 единиц.

В.В. САВИНКИН

канд. техн. наук
Северо-Казахстанский
государственный
университет
им. М. Козыбаева,
Петропавловск, Казахстан,
В.Н. КУЗНЕЦОВА

д-р техн. наук
Сибирская государственная
автомобильно-дорожная
академия «СибАДИ»

В упрочненных слоях металла наблюдается однородное дробление зерен и повышение микротвердости до 700–760 HV. Структура материала однородная, неметаллические включения (ликвация) отсутствуют. Исследуемые зоны однородны по рельефу; очагов развития трещин с усталостными межкристаллическими бороздками не наблюдается; усталостный питтинг и трековые следы отсутствуют; усадочных раковин и расслоения структуры не выявлено.

Микроструктура металла состоит из среднеигольчатого мартенсита и легированного феррита, выделившегося по границам первичных аустенитных зерен. Величина действительного зерна микроструктуры металла соответствует баллу 6 согласно ГОСТ 5639-82. Ближе к границе упрочнения величина действительного зерна возрастает до 5-го и даже 4-го балла по ГОСТ 5639-82, что свидетельствует о том, что металл на этом участке длительное время имел температуру, превышающую температуру интенсивного роста зерна аустенита. Зона упрочнения поверхности металла представляет собой доэвтектический ледебурит. По мере удаления от границы упрочнения, количество цементита в структуре основного металла постепенно уменьшается.

На расстоянии 0,9–1,4 мм от границы упрочнения структура основного металла состоит из перлита и феррита. Микротвердость основного металла уменьшается от границы упрочненного слоя вглубь образца от 400 HV (ледебурит) до 280 HV (зернистый перлит и феррит, металлическая основа).

Вывод: качество металла образца серии 1 удовлетворительное. Структура и физико-механические свойства имеют значения характеристик стали 20ХН3А по ГОСТ 4543-71 с упрочнением и способны выдерживать динамические нагрузки, соответствующие базовому числу циклов $N_{\text{но}} \geq 12 \cdot 10^7$ [1].

Образцы серии 2. Пятно контакта на рабочей поверхности зубьев имеет следы износа и смещение относительно проектной оси зуба, характеризуется как пятно неправильной формы. Структура металла однородная, ликвация отсутствует. По мере расширения пятна контакта и отдаления его от проектной оси наблюдается изменение геометрии зуба. Местами около основания наблюда-

ется контактный питтинг. Твердость пятна контакта снижена до HRC 42 ... 45. В месте контакта наблюдается появление в структуре незначительной деформации зерна. Кристаллическая решетка имеет нарушение межатомных связей. По границам пятна контакта наблюдается зарождение напряжений в структуре металла. На поверхности износа наблюдаются деформация зерна структуры и следы тиснения поверхностного слоя.

Вывод: качество металла образца 2 удовлетворительное. Однако искажение геометрии зуба вызвано осевым смещением пятна приложения периодически действующей циклической нагрузки. Зарождение усталостных напряжений приводит к изменению структуры и рельефа зон контакта. Представленная динамика характеризуется появлением усталостных межкристаллических бороздок, что вызывает возникновение очагов трещин. Данные факторы вызывают неспособность материала противостоять динамическим нагрузкам и разрушительному действию усталостных напряжений. Как правило, усталостное разрушение обычно начинается при очень малой видимой пластической деформации и имеет характер хрупкого разрушения. Поэтому научный и практический интерес представляют комплексные исследования изменения состояния поверхности трибологических сопряжений при длительном интенсивном нагружении.

Образцы серии 3. В упрочненных слоях металла наблюдается однородное дробление зерен и повышение микротвердости HV до 700–760, что соответствует технологии упрочнения. Зона упрочнения поверхности металла представляет собой доэвтектический ледебурит.

В исследуемой структуре деформированного металла наблюдается ряд характерных особенностей. Так, в типичном металле – железе – деформация вызывает появление системы параллельных линий в зерне. Направления линий, которые называют линиями скольжения, параллельны в пределах одного зерна, но различны в различных зернах. При увеличении деформации линии сливаются в более широкие полосы скольжения, внутри зерен или по их границам появляются трещины. Расположенные

близко друг к другу трещины сливаются в магистральную трещину и металл разрушается. Зарождение очага выкрашивания зуба наблюдается в зоне пятна контакта, смещенного относительно проектной оси. Вид разрушения исследованных образцов соответствовал усталостному [2] (рис. 1).

Изломы соответствуют усталостному разрушению, когда разрушение происходит, в основном, при упругом деформировании, а максимальные значения возникающих напряжений ниже предела текучести стали. В структуре наблюдается деформация зерна микроструктуры у основания зуба (место приложения нагрузки), в зоне формирования усталостных напряжений – очаги трещин. Ближе к глубине излома установлено отслоение и откол слоя, что характеризует неоднородность рельефа. О действии разных по значению напряжений свидетельствует изменение цвета скола от темного до серебристо-матового. На границе разрыва металла наблюдаются следы наклепа (следствие больших знакопеременных нагрузок).

Вывод: качество металла образцов серии 3 удовлетворительное. Структура и физико-механические свойства имеют оптимальные значения характеристик 20ХН3А согласно ГОСТ 4543-71 с упрочнением и способны выдерживать динамические нагрузки, соответствующие базовому числу циклов $N_{\text{но}} \geq 12 \cdot 10^7$. Рельеф поверхности разрушения зуба соответствует усталостному по механизму многоциклового усталости, характерному для зубчатой передачи, а начало разрушения у основания зуба является типичным при равной прочности материалов обеих соприкасающихся поверхностей. Рельеф поверхности разрушения зуба в области стабильного развития трещины показан на рис. 2.

В данном случае разрушению способствовало неравномерное нагружение рабочих поверхностей зуба вследствие нарушения условий сборки или эксплуатации. Для цементованной шестерни из стали 20ХН3А, несмотря на высокую твердость поверхности, была отмечена значительная пластическая деформация в виде развальцованных язычков (рис. 3).

Рельеф излома зоны начального разрушения характеризовался растрескиванием материала, разупорядоченными фрагмен-

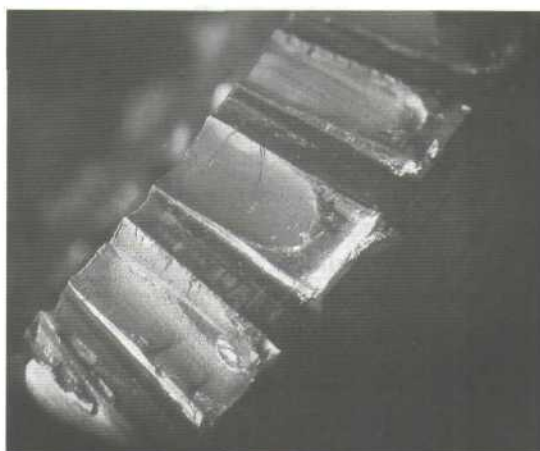
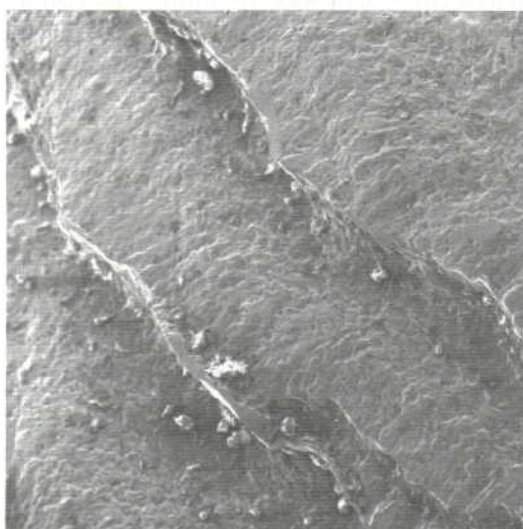


Рис. 1. Общий вид выкрошенных зубьев шестерни (x 1,5)



SEM HV: 15.00 kV SEM MAG: 200 x View field: 1.13 mm 200 µm
PC: 7 Det: SE Detector SM: RESOLUTION VEGA II TESCAN
Digital Microscopy Imaging

Рис. 2. Усталостные бороздки и складки в зоне стабильного развития трещины шестерни из стали 20ХН3А



SEM HV: 15.00 kV SEM MAG: 1.00 kx View field: 226.2 µm 50 µm
PC: 4 Det: SE Detector SM: RESOLUTION VEGA II TESCAN
Digital Microscopy Imaging

Рис. 3. Развальцовочные язычки, траковые следы, плато на участке стабильного развития трещин шестерни

тами различной формы. Граница между начальной зоной и зоной последующего роста трещины была четкой и свидетельствовала, что в начальной зоне разрушение материала произошло практически за счет хрупкого проскальзывания, а далее от границы дефекта происходило зарождение усталостной трещины вдоль всего контура. Разрушение упрочненных шестерен происходило в виде откола головки зуба из-за развития контактной усталости или повышенной выработки рабочих поверхностей.

Установлено [3], что продукты фреттинга формируются в изломе при различных видах нагружения, формах трещин и размерах образцов на всех стадиях стабильного роста усталостной трещины, включая образование усталостных бороздок. Следует отметить, что в припороговой области разрушения они занимают большие по площади участки излома, так что переход к стадии образования усталостных бороздок макроскопически легко фиксируется по смене цвета излома. На начальной стадии разрушения излом темный, а при подавляющей доле продуктов фреттинга практически черный и далее приобретает светлый оттенок, что указывает на резкое уменьшение доли продуктов фреттинга в изломе.

Усталостное разрушение происходит обычно внезапно, после большого числа нагружений и при напряжениях, заметно меньших предела прочности материала, соответствующего однократному статическому нагружению. Сопротивление усталостному разрушению особенно мало при воздействии нагрузки противоположного

направления, когда напряжение в опасной точке сечения меняется.

Усталостные изломы представляют собой непосредственный результат нарушения сплошности материала и демонстрируют динамику разрушения. При усталостном разрушении на изломе наблюдается две зоны – мелкозернистая и с волокнистым строением. В непосредственной близости к границе излома у очага разрушения были выявлены усталостные мезолинии с шагом около 0,5 мкм. Формирование мезолиний отражает закономерности повреждения материала при распространении усталостной трещины.

Образцы серии 4. Исследование химического состава образцов проводилось методом спектрального анализа с помощью атомно-эмиссионного спектрометра с лазерным возбуждением «ЛАЭС». Результаты определения химического состава представлены в таблице. Химический состав соответствует стали типа 20ХН3А.

Распределение микротвердости по толщине поверхностного слоя представлено на рис. 4.

Твердость поверхностного слоя в пределах HRC 56 ... 58 распространяется на глубину до 1,3 мм от поверхностного слоя, что соответствует характеристикам материала, подвергнутого цементации.

Используемый при изготовлении шестерен материал отвечает требованиям стандартов и, следовательно, не является причиной образования дефектов. Выполненные исследования показали, что в результате длительного действия переменных по вели-

Химический состав исследуемого образца, %

Образец, №	Содержание элементов, %					Марка материала, заключение по анализу
	C	Si	Mn	Cr	Ni	
Образец 1.1	0,20	0,28	0,39	0,80	3,04	20ХН3А (ГОСТ4543-71)
Образец 1.2	0,21	0,29	0,41	0,79	3,05	20ХН3А (ГОСТ4543-71)
Образец 1.3	0,21	0,28	0,40	0,81	3,04	20ХН3А (ГОСТ4543-71)
Образец 1.4	0,20	0,28	0,39	0,80	3,04	20ХН3А (ГОСТ4543-71)
Образец 1.5	0,21	0,29	0,40	0,81	3,05	20ХН3А (ГОСТ4543-71)

чине контактных напряжений на рабочих поверхностях зубьев возникают усталостные трещины, развитие которых приводит к миграции и отделению частиц металла. Наблюдается формирование межкристаллических трещин в виде паукообразных тонких полосок.

Разрушение начинается на ножке зуба в околополюсной зоне, где развивается наибольшая сила трения, способствующая пластическому течению металла и образованию микротрещин на поверхности зубьев. Развитию трещин способствует расклинивающий эффект смазочного материала, который запрессовывается в трещины зубьев при зацеплении. Это приводит к выкрашиванию частиц поверхности, образованию мелких ямок, переходящих в раковины. Также выявлены следы задиров при набегании шестерни и следы ударов при несоответствии осей зацепления.

Схожесть структурных составляющих и фазовых характеристик всех образцов при разных характерах дефектов подтверждает то, что причиной изломов зубьев является не материал. Его качество не подвергается сомнению. Значит, контактная поверхность способна воспринимать расчетную нагрузку. Характер изломов и его структура свидетельствует о том, что обломы происходят по причине усталостного износа. Особенно негативно влияет на усталостный излом смещение пятна контакта относительно проектной оси симметрии зуба.

В известных методиках расчета усталостной прочности не учитывается воздействие концентраций напряжений изгиба, возникающих от действия моментов сил, и отклонение пятна контакта от проектной оси симметрии на структурную составляющую. Следовательно, расчет напряжений в кинематической паре зацепления экскаватора требует пересмотреть и усовершенствовать стандартную методику с учетом непостоянных во времени действующих нагрузок и формирования питтинга в межзубных связях кристаллической решетки венца опорно-поворотного круга экскаватора.

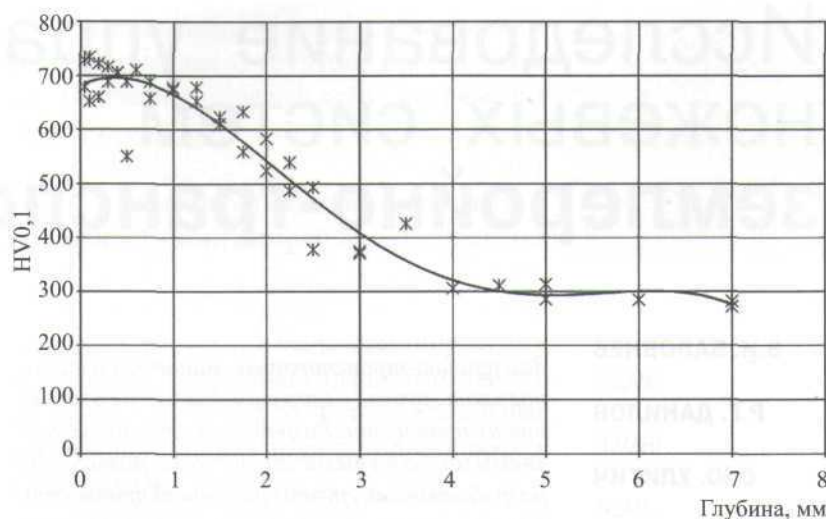


Рис. 4. Распределение микротвердости по толщине поверхностного слоя

Список литературы

1. Кузнецова В. Н. Исследование влияния инерционной нагрузки рабочего оборудования экскаватора на формирование концентраций напряжений в его элементах / Кузнецова В. Н., Савинкин В. В., Яковлев В. Г. // *Строительные и дорожные машины*. – 2015. – № 5. – С. 52 – 55.
2. Киселев Л. А. Разработка технологии восстановления зубьев крупногабаритных шестерен и муфт СДМ / Киселев Л. А., Кузнецова В. Н., Савинкин В. В. // *Строительные и дорожные машины*. – 2012. – № 10 – С. 22 – 24.
3. Орлов М. Р. Замедленное разрушение стали 38ХНЗМА в процессе длительной эксплуатации / М. Р. Орлов, О. Г. Оспенникова, В. И. Громов // *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Машиностроение»*. – 2011. – № SP2. – С. 5–12.

Annotation. To study the influence of dynamic loads on the durability and wear pattern slewing excavator investigated macro- and microstructure of the teeth of his crown at all stages of formation of a defect. It was established that destruction of hardened gears is due to fatigue of the contact forming cracks, which leads to the development of migration and separation of the metal particles.

Keywords: durability, structure, fatigue tension, metallography.

СДМ