

ное целое. Учитывая, что коэффициент поверхностной диффузии больше чем объемной [3], вклад в изменение размера поры диффузии по границам зерен может быть существенным. Кроме того, разность температур создает давление, сжимающее пору в направлении градиента температуры. В результате учета перечисленных факторов можно ожидать, что при кратковременной высокотемпературной обработке в приповерхностной области металла малые поры залечиваются полностью; поры, лежащие близко к поверхности выходят на поверхность, создавая беспористую "корку", что приводит к дополнительному упрочнению материала. Управляя физико-механическими свойствами материалов основы и покрытия возможно обеспечить заданный уровень прочностной надежности.

Литература. 1.Завистовский В.Э. Механика разрушения и прочность материалов с покрытиями. - Новополоцк: ПГУ, 1999.- 144 с. 2.Болотин В.В. Объединенные модели в механике разрушения // Известия АН СССР: Механика твердого тела, 1984, N 3.- с.127 -137. 3.Гегузин Я.Е. Диффузионная зона. - М. : Наука, 1979.- 344 с. 4.Завистовский В.Э., Богданова Е.А., Завистовский С.Э. Структурно-диффузионный механизм залечивания микротрещин при изнашивании // Трение и износ, 1997. Том 18, № 1.- с. 42-45. 5.Черемской Т.Г., Слезов В.В., Бетехтин В.И. Поры в твердом теле.- М.: Энергоатомиздат, 1990.- 256 с. 6.Zavistovskiy V.E., Bogdanova E.A., Krivenok S.K. Evolution of structure of material with coating at high temperature exposure // ВAMFAC'98.- Vilnius: Technika, 1998.- p.172-177. 7. Надежность и эффективность в технике: Справочник. В 10 т. Т.5.: Проектный анализ надежности / Под ред. В.И. Патрушева и А.И. Рембизы.- 316 с.

УДК 669.621.785

ВИДЫ ПРЕЖДЕВРЕМЕННЫХ ПОЛОМОК ДЕТАЛЕЙ И МЕТОДЫ ИХ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ

Гурченко П.С., докт. техн. наук Минский автомобильный завод, Минск, Беларусь

Рассмотрены и систематизированы наиболее часто повторяющиеся виды износа и поломок деталей автомобиля МАЗ, исследованных в Центральной заводской лаборатории МАЗ в связи с преждевременным выходом из строя и предположительные причины их вызывающие, установленные в процессе металлографических исследований. Приведены практические рекомендации по конструктивным и технологическим мерам, позволяющим снизить вероятность наиболее часто встречающихся разрушений деталей

Разрушение деталей в большинстве случаев происходит в результате воздействия целого ряда неблагоприятных факторов. Одни из них возникают уже на стадиях конструирования и выбора материала деталей. Другие появляются при изготовлении, упрочнении и сборке деталей, а также в процессе эксплуатации из-за нерациональных режимов эксплуатации и обслуживания. В связи с этим установление истинной причины разрушения детали часто не может быть выполнено каким-то конкретным видом исследования или расчетом. С достаточной степенью достоверности причина разрушения в большинстве случаев может быть установлена только комплексом исследований, включающих проверку расчетов на прочность, анализ технологии изготовления и сборки узлов и условий эксплуатации, исследование характера и следов взаимодействия

разрушенной детали с сопряженными, изучение поверхностей разрушения, химического состава, структуры и твердости материала разрушенной и сопряженных деталей.

В отдельных случаях поломка или износ наступает из-за единственного из перечисленных выше факторов. Установление причины разрушения в этом случае значительно упрощается и может быть достигнуто уже в процессе визуального осмотра или металлографических исследований разрушенной детали.

Зубчатые передачи. Одним из видов разрушения шестерен, выявляющимся как на стадии изготовления автомобилей, так и при их эксплуатации являются сколы зубьев. Наиболее часто они представляют собой отслоение части зуба под углом примерно 45° к его оси с выходом поверхности разрушения на рабочие поверхности, торец и вершину зуба (рис.1, а). Этот вид разрушения часто появляется уже в процессе производства деталей, изготовленных из цементуемых марок стали и прошедших полный цикл упрочнения. В процессе производства он выявляется в виде трещин и сколов, обнаруживаемых в процессе очистки дробью и при шлифовании упрочненных шестерен, а также при незначительных ударах деталей.

В ряде случаев закалочные микротрещины не выявляются в производстве, а раскрываются уже в процессе эксплуатации и становятся причиной поломки всего узла и выхода из строя автомобиля в целом. Иногда термические напряжения, возникающие в процессе упрочнения, не приводят к поломкам и трещинам в процессе производства, но накладываясь на эксплуатационные нагрузки, приводят к возникновению внутренних напряжений в материале деталей, превышающих критические значения, что приводит к разрушению деталей машин уже в процессе эксплуатации при отсутствии видимых причин. Установить причину поломки в этом случае наиболее трудно.

Установлено, что образованию сколов трещин и чрезмерных термических напряжений способствуют наличие карбидной сетки в микроструктуре цементованного слоя, (рис.2, а), большая толщина слоя, высокая твердость сердцевины зуба, неравномерное распределение структурных составляющих в упрочненном слое, повышенное содержание остаточного аустенита и крупноигльчатая структура (рис.2, б.) , являющиеся следствием нарушения режимов цементации и перегрева при закалке. Необходимо отметить, что в литературе встречаются противоречивые мнения о влиянии остаточного аустенита на износостойкость. По данным отдельных работ наличие остаточного аустенита в углеродистых сталях увеличивает их износостойкость. Ю.А. Геллер считает, что наличие в углеродистых сталях 10 -- 15% остаточного аустенита не влияет на твердость и износостойкость, а при большем содержании снижает их. Исследованиями деталей автомобилей МАЗ установлено, что содержание в цементованном слое 20% и более остаточного аустенита приводит к преждевременному разрушению цементованных шестерен.

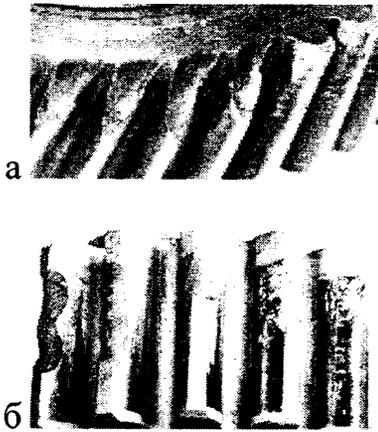


Рис.1. Вид сколов на зубьях шестерен: а – сталь 25ХГТ, цементация, твердость сердцевины 47 HRC, б – 20ХН3А, цементитная сетка в структуре упрочненного слоя.

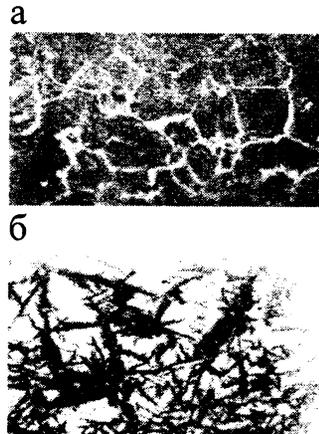


Рис.2. Дефектная структура цементованного слоя, приводящая к сколам зубьев x 500: а - цементитная сетка в структуре слоя, б – крупноигельчатый мартенсит, более 30% остаточного аустенита,

Прочность зуба при изгибе при максимальном нагружении (при резком трогании с места с максимальным крутящим моментом, резком торможении, заклинивании), определяется, в основном, твердостью сердцевины и изменяется пропорционально числу твердости HB. Однако излишне высокая твердость приводит к резкому снижению долговечности зубчатого колеса в результате хрупкого разрушения при возрастании нагрузки. Рекомендуемая различными исследователями твердость сердцевины зуба колеблется от 20 до 50 HRC. Для тяжело нагруженных зубчатых колес этот интервал составляет 28 – 42 HRC. При такой твердости в стали сочетаются высокая прочность и достаточная пластичность. Нерациональный выбор материала шестерен, иногда имеющий место при заменах, не предусмотренных чертежом, или нарушения режимов упрочнения часто является причиной поломок из-за несоблюдения рекомендуемой твердости сердцевины зубьев. Исследованиями шестерен автомобилей МАЗ установлено, что при твердости сердцевины зуба менее 24 HRC часто происходит разрушение в виде продавливания цементованного слоя, смятия и поломка зубьев у основания. На рис.3, а) показан характер разрушения шестерен, изготовленных из стали 18ХГТ и упрочненных цементацией на глубину 1,0 мм и последующей закалкой с твердостью сердцевины 23 HRC.

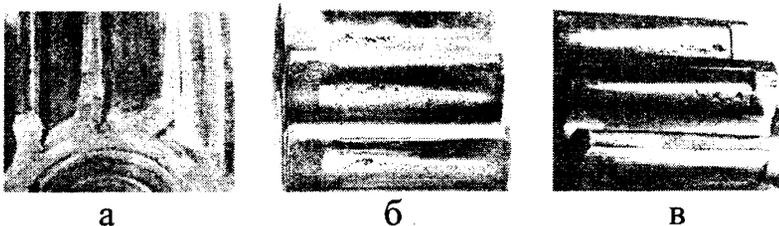


Рис.3. Вид преждевременно разрушенных при эксплуатации шестерен: а – 18ХГТ, цементация 1,0 мм, твердость поверхности 58 HRC, сердцевины – 23HRC, (продавливание цементованного слоя и смятие зубьев), б, в – питтинг, 20ХН3А, цементация 1,2 мм, твердость поверхности 61 HRC .

Структура сердцевины в этом случае представляет собой троостосорбит и участки феррита, ориентированные по границам зерен, что свидетельствует о заниженной температуре нагрева под закалку. Общеизвестно, что наличие феррита в структуре сердцевины зуба снижает также усталостную прочность зуба. При твердости сердцевины зубьев более 45HRC имели место сколы и хрупкие поломки зубьев, показанные на рис.1. Высокая твердость сердцевины зубьев обычно сопровождается крупноигльчатой структурой цементованного слоя также приводит к снижению ударной вязкости. Контактное выкрашивание (питтинг) относится к основным причинам выхода из строя зубчатых колес, испытывающих высокие контактные напряжения. Для отдельных шестерен автомобилей и тракторов эти напряжения достигают 2300 МПа и более. При проектировании уровень допустимых контактных напряжений и определяет размеры шестерен. Выкрашиванию способствует недостаточная твердость поверхности, низкие точность зацепления и чистота поверхности, обезуглероженность поверхности, низкая твердость сердцевины зуба, мелкие участки феррита или троостита на поверхности, недостаточность смазки. При мягкой сердцевине возможно разрушение зубчатого колеса под поверхностным слоем. На контактную усталость влияет и комбинация материалов взаимодействующих колес; особенно неблагоприятна комбинация мягкой поверхности с цементованной. Достаточно высокой контактной выносливостью обладает мелкоигльчатый мартенсит, полученный поверхностной закалкой ТВЧ и цементованная поверхность. При этом некоторые исследователи указывают на лучшую стойкость против выкрашивания цементованных зубчатых колес, другие же указывают на большую стойкость закаленных ТВЧ. Причину преждевременного появления питтинга во многих случаях определить бывает трудно в связи со сложностью определения влияния многих факторов. На рис.3, б, в) показан износ поверхности зубьев, имеющий вид питтинга. При этом на рис.3, в) видно, что пятно контакта рабочей поверхности одностороннее из-за неточности изготовления или сборки, или появления закалочных деформаций, что в данном случае можно расценивать, как главную причину преждевременного износа, что однако не исключает и других неблагоприятных факторов. Установлено, что источником деформаций могут быть также остаточные внутренние напряжения от обработки резанием, они наиболее значительны при нарезке зубьев затупленным инструментом, либо при некачественной исходной структуре заготовок, ухудшающей условия резания. На Минском автозаводе разработаны и применяются методы поверхностной закалки зубчатых колес при индукционном нагреве, позволяющие полностью исключить деформации в процессе упрочнения и значительно повысить точность зацепления передач.

Большое влияние на снижение контактной выносливости оказывает качество шлифования. При нарушении режимов шлифования на обрабатываемой поверхности образуются пятна отпуска, прижоги и вторичной закалки. Поверхностный слой при этом приобретает неоднородную пятнистую структуру. Образуются растягивающие напряжения и шлифовочные трещины, которые значительно снижают срок службы деталей. На рис.4. видны прижоги и трещины образовавшиеся в процессе шлифовки торцевой поверхности шестерни.



Рис.4. Трещины и прижоги на торце шестерни из стали 20ХН3А после цементации на 1,2 мм, закалки 60 HRC и последующего шлифования

В процессе многократных циклических изгибающих нагрузок наибольшие напряжения развиваются в корне зуба. При превышении этих нагрузок определенной величины может происходить усталостное разрушение зуба. Усталостная прочность зуба при изгибающих нагрузках часто определяет долговечность тяжело нагруженных зубчатых колес. В наибольшей степени она зависит от вида и способа закалки. Так, по мнению многих экспериментаторов, по сравнению с улучшенным состоянием после закалки ТВЧ по зубу выносливость снижается, после закалки по впадине непрерывно-последовательным способом возрастает в 1,5-10 раз, после закалки по контуру на глубину 1,5 мм - возрастает на 37 %, а при большой глубине – снижается по сравнению с незакаленными. После закалки ТВЧ на поверхности зубьев возникают сжимающие напряжения в значительной степени повышающие усталостную прочность. Существенно ухудшают усталостную прочность зубчатых колес, упрочненных цементацией, цементитная сетка по границам зерен и наличие остаточного аустенита более 20%. Усталостный характер разрушения зубьев достаточно точно определяется осмотром поверхности излома, как и для других деталей.

При оценке влияния глубины, твердости и формы расположения упрочненного слоя на усталостную прочность наиболее часто считают, что более благоприятно расположение закаленного слоя равномерно по контуру зубчатого колеса, аналогично цементованному. При этом ориентировочная рекомендуемая толщина упрочненного слоя h в зависимости от модуля m должна соответствовать значениям:

m	1,5-2,25	2,5-3,5	4,0-5,5	6,0-10	11-12	14-18
h	$0,3 \pm 0,1$	$0,5 \pm 0,2$	$0,8 \pm 0,3$	$1,2 \pm 0,3$	$1,5 \pm 0,4$	$1,8 \pm 0,5$

Детали, испытывающие циклические нагрузки

Основными видами разрушения деталей типа валов, осей, кронштейнов, рычагов при эксплуатации являются: вязкое скручивание (рис.5,а), хрупкое разрушение (рис.5,б) и усталостное разрушение (рис. 6, а, б).

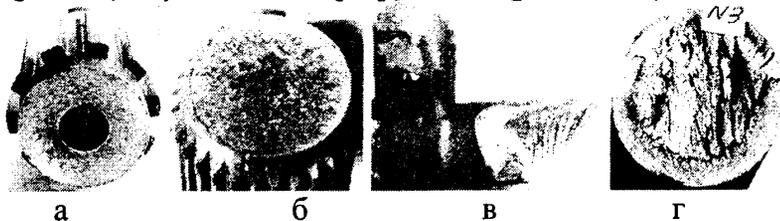


Рис.5. Внешний вид излома полуосей автомобиля МАЗ после вязкого скручивания а, б (35ХГС, закалка и отпуск 210 НВ) и хрупкого – в, г, (в - 40Х, сквозная закалка 54HRC, г – 40Х, поверхностная закалка при индукционном нагреве).

Во всех случаях вязкого скручивания для деталей нетермообработанных, нормализованных и улучшенных установлена заниженная твердость термообработки, например, 190 – 230 НВ вместо 240 – 297 НВ.

Хрупкое разрушение при скручивании наблюдается чаще и обычно является следствием высокой твердости (50 HRC и более) объемно закаленных деталей или повышенной толщины закаленного слоя при упрочнении закалкой ТВЧ. Практика применения закалки деталей автомобилей МАЗ сложной конфигурации, имеющих в зоне закалки шлицы, отверстия или проточки, а также зона закалки на которых одновременно охватывает цилиндрическую часть и прилегающую галтель, показывает, что в ряде случаев для отдельных партий стали происходит массовое появление закалочных трещин в этих зонах (рис.6,а). Не выявленные в процессе производства трещины являются основной причиной хрупких поломок деталей в процессе эксплуатации. Одной из причин, способствующих появлению этих трещин, может являться неодновременность протекания процессов охлаждения и структурных превращений для цилиндрической части и галтели изделий.

Причиной усталостного разрушения, как правило, являются: присутствие концентраторов напряжения в виде подрезов в местах перехода сечений, грубая механическая обработка, заниженная твердость термообработки, наличие феррита в структуре упрочненного материала. По виду поверхностей усталостного излома можно судить о характере и величине действовавших нагрузок. Наличие нескольких очагов разрушения свидетельствует о равномерной и невысокой концентрации напряжений, обычно такой вид имеет излом детали после некачественного упрочнения (Рис. 6, б, в). Один очаг разрушения свидетельствует, как правило, об односторонности циклической изгибающей нагрузки.

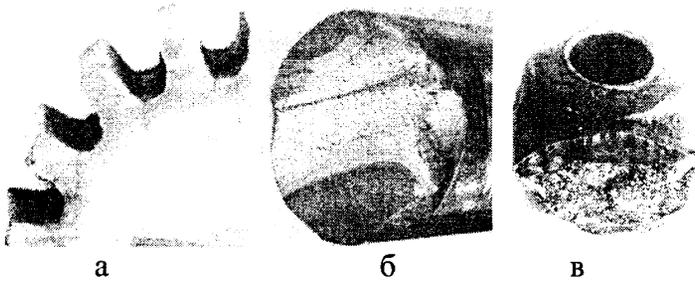


Рис.6. Закалочные трещины, а) и внешний вид усталостно разрушенных деталей б, в: б – 40ХН, твердость 204НВ, б – рычаг рулевой трапеции, 40ХН, твердость 229НВ.

Пружины, рессоры. Условия работы пружин и рессор предполагают высокий предел усталости, который достигается при высоких значениях прочности упругости. Такие свойства в наибольшей степени обеспечивает структура троостита, троостосорбита и мелкодисперстного сорбита в зависимости от несущих нагрузок. Недопустимым в структуре пружин является присутствие феррита. Это приводит к остаточной деформации и усталостным поломкам.

Также недопустимым является присутствие в структуре пружин и рессор мартенсита, которое является основной причиной хрупких поломок. В практике Минского автозавода известны случаи хрупких поломок пружин уже при сборке автомобиля, например, поломки пружин опрокидывания кабины автомобиля МАЗ. Причиной таких поломок, является завышенная твердость. Во всех таких случаях исследованиями установлены структуры троостомартенсита или мартенсита с твердостью 49 HRC и более.

Установлено, что основными видами разрушения пружин являются: хрупкое разрушение по причине высокой твердости; усталостные разрушения вследствие наличия поверхностных дефектов в виде трещин, обезуглероженного слоя, коррозии и др.

Причины и характер поломок рессор аналогичны пружинам. Так исследованиями установлено, что 80% всех поломок рессорных листов связаны с завышенной твердостью, наличием в структуре мартенсита, обезуглероженного слоя и других дефектов металла.

Крепежные детали. Разрушение болтов, шпилек, заклёпок и других крепежных деталей в процессе эксплуатации и монтажа приводят к серьезным повреждениям узлов и автомобиля в целом. При этом наиболее часто происходит вязкое разрушение вследствие недостаточного запаса прочности. Причинами в этом случае являются неправильный выбор размеров, марки стали, некачественная термообработка. Встречается хрупкое разрушение из-за завышенной твердости после термообработки и хрупкое разрушение деталей, полученных методом холодной высадки из-за наличия в структуре структурно-свободного цементита.

Для устранения вязких разрушений нетермообработанных болтов и шпилек рекомендуется применение более прочной стали или введение термообработки. Обычно для

болтов и шпилек предусмотрена термообработка на твёрдость 26-32 HRCэ. Для болтов, испытывающих высокие и сложные напряжения в работе, применяют стали 40X и 40XH, термоулучшенные на 32-40 HRCэ.

Часто происходит смятие резьбы болтов из-за наличия обезуглероженного слоя, образующегося в процессе отжига металла и термообработки готовых болтов. Для предотвращения этого применяют безокислительные методы нагрева в защитных средах при термообработке и индукционный нагрев токами высокой частоты.

Имеют место случаи хрупкого разрушения заклёпок по причине присутствия в структуре скоплений структурно свободного цементита. Такая структура обладает повышенной хрупкостью. Пластические свойства заклёпок в этом случае восстанавливаются нормализацией.

УДК 620.722

А.А. Ракицкий, В.В. Малятин

ОЦЕНКА СОПРОТИВЛЕНИЯ ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

*Институт надёжности машин НАН Беларуси
Минск, Беларусь*

Для целого ряда сталей и сплавов механические характеристики - предел текучести, предел прочности, истинное сопротивление разрушению, относительное сужение и удлинение, полученные в условиях динамического нагружения, существенно отличаются от статических значений. Это обстоятельство может оказывать влияние и на поведение критического коэффициента интенсивности напряжений в зависимости от скорости приложения нагрузки. Следовательно, использование в расчетах несущей способности конструкций при их проектировании, а равно и при выборе материала, значений K_{Ic} и K_c , полученных в условиях статического нагружения, может привести к опасной переоценке эксплуатационных свойств материала конструкций, работающих в условиях воздействия динамических нагрузок. Исходя из этого необходимо принимать во внимание динамические значения критического коэффициента интенсивности напряжений K_{Ic} или K_c . Этим объясняется повышенный интерес к исследованию трещиностойкости в условиях динамического нагружения. Однако, по имеющемуся к настоящему моменту данным, трудно с полной определенностью судить о характере изменения трещиностойкости с ростом скорости деформирования.

Таким образом, необходимо отметить, что к настоящему времени отсутствуют четкие представления о степени влияния скорости нагружения и скорости деформации на критический коэффициент интенсивности напряжений. Общепризнанным является то, что сопротивление распространению трещины, есть характеристика материала, существенно и неоднозначно зависящая от скорости нагружения.

Исходя из этого при выборе материала для элементов конструкций по трещиностойкости, необходимо проводить оценку K_{Ic} (K_c) при скорости нагружения, соответствующей эксплуатационным условиям.

Трещиностойкость в условиях плоской деформации оценивалась испытаниями ВР-образцов (материал: сталь Ст.3, 50ХНЗМА). Существенным преимуществом ВР-