

УДК 669.17: 620.184

ХАРАКТЕР И ПРИЧИНЫ РАЗРУШЕНИЯ ШЕСТЕРЁН ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

**С.И. Бондаренко, доцент, к.т.н., В.А. Карпенко, профессор, д.т.н.,
Е.А. Нестеренко, ассистент, ХНАДУ,
Л.В. Пирогова, инженер, Харьковский тракторный завод**

Аннотация. Исследованы характер разрушения и причины выхода из строя шестерён тракторов и бульдозеров, даны рекомендации по повышению долговечности и надёжности шестерён.

Ключевые слова: усталостное разрушение, питтинги, изнашивание, мгновенная поломка, деформация, цементация, нитроцементация, закалка.

ХАРАКТЕР І ПРИЧИНИ РУЙНУВАННЯ ШЕСТЕРЕНЬ ДОРОЖНЬО-БУДІВЕЛЬНИХ І СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН

**С.І. Бондаренко, доцент, к.т.н., В.О. Карпенко, професор, д.т.н.,
О.А. Нестеренко, асистент, ХНАДУ,
Л.В. Пірогова, інженер, Харківський тракторний завод**

Анотація. Досліджено характер руйнування і причини виходу з ладу шестерень тракторів і бульдозерів, подано рекомендації щодо підвищення довговічності і надійності шестерень.

Ключові слова: утомне руйнування, пітінги, зношування, раптова поломка, деформація, цементация, нитроцементация, гартування.

CHARACTER AND GEAR FAILURE CAUSES OF CONSTRUCTION AND AGRICULTURAL MACHINERY

**S. Bondarenko, Associate Professor, Candidate of Technical Science,
V. Karpenko, Professor, Doctor of Technical Science,
E. Nesterenko, assistant, KhNAHU, L. Pirohova, engineer, Kharkiv Tractor Plant**

Abstract. The failure character and gear breaking down causes of tractors and bulldozers have been investigated. Recommendations for increasing service life and reliability of gears have been given.

Key words: fatigue failure, pitting, wearing, abrupt fracture, deformation, carburizing, carbonitriding, hardening.

Введение

Повышение надёжности отдельной детали, узла, машины в целом позволяет увеличить работоспособность, снизить металлоёмкость, уменьшить энергетические и материальные затраты, что очень важно в условиях современного экономического развития нашей страны [1].

Весьма ответственными и тяжёлонагруженными деталями автомобилей, дорожно-строи-

тельных и сельскохозяйственных машин являются шестерни, преждевременный выход из строя которых может привести к значительным экономическим потерям, связанным с ремонтом и техническим обслуживанием. В связи с этим изучение причин разрушения шестерён является важной задачей.

Анализ публикаций

Зубчатые колёса автомобилей, дорожно-строительных и сельскохозяйственных машин

работают в сложных условиях. Зубья испытывают трение и износ, переменные по величине контактные давления, статические и циклические напряжения при изгибе, динамические нагрузки [2]. Особенности эксплуатации зубчатых колёс тракторных трансмиссий является неустановившийся режим работы, реверсивность, вибрации и т.п.

В связи с вышесказанным материал зубчатых колёс должен обладать высокой прочностью, твёрдостью и износостойкостью поверхности, контактной выносливостью, статической и усталостной прочностью при изгибе, достаточной вязкостью.

Для изготовления шестерён применяют улучшаемые стали, подвергаемые поверхностной закалке, и цементируемые легированные стали, подвергаемые цементации и нитроцементации.

Задача повышения надёжности и долговечности зубчатых колёс тесно связана с анализом причин преждевременного выхода из строя. В ряде работ приведены отдельные примеры разрушения шестерён [3–5]. Так, в работе [3] описан характер разрушения шестерни крана и шестерни коробки передач после поверхностной закалки, планетарной и спиральной шестерён – после цементации и проанализированы причины их выхода из строя. Рассмотрен, в основном, только механизм усталостного разрушения. В работе [4] исследовано разрушение цементованного зубчатого колеса при статической перегрузке и сколы на цементованных зубчатых колёсах. В работе [5] приведен усталостный излом зуба шестерни и показаны питтинги на рабочей поверхности шестерни.

Систематического исследования причин разрушения шестерён в литературе нет, в частности не исследовался механизм разрушения нитроцементованных шестерён, хотя нитроцементация в настоящее время является очень распространённым и перспективным методом химико-термической обработки. Так, на ВАЗе нитроцементации подвергают 94,5 % деталей, упрочняемых ХТО [1].

В связи с этим изучение причин преждевременного выхода из строя шестерён, в том числе подвергнутых нитроцементации, является актуальной задачей.

Цель и постановка задачи

Поставлена задача исследовать характер разрушения шестерён и факторов, влияющих на преждевременный выход их из строя, в частности режимов химико-термической и термической обработки, и предложить рекомендации по повышению работоспособности шестерён.

Материал и методика исследования

В работе было изучено большое количество шестерён тракторов и бульдозеров, сломавшихся в эксплуатации, и проведен анализ причин разрушения. Работа выполнялась в Центральной заводской лаборатории Харьковского тракторного завода.

На заводе шестерни изготавливаются в основном из сталей 18ХГТ и 25ХГТ. Заготовки шестерён получают горячей штамповкой. После нормализации и механической обработки шестерни подвергают цементации или нитроцементации с последующей закалкой и низким отпуском.

Все разрушенные шестерни подвергались внешнему осмотру, определялся химический состав стали, измерялась твердость по Роквеллу, исследовалась микроструктура на микроскопе МИМ-8 при увеличении $\times 100$ для измерения глубины упрочнённого слоя и при увеличении $\times 400$ – для оценки микроструктуры цементованного и нитроцементованного слоя и сердцевины детали.

Результаты исследования и их обсуждение

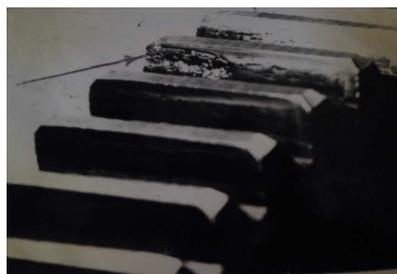
Выполненные исследования показали, что основными видами разрушений зубчатых колёс являются следующие: усталостное выкрашивание рабочих поверхностей зубьев; усталостное разрушение зуба при изгибе; износ рабочих поверхностей зубьев и торцевой износ; деформация и выработка зубьев; внезапные поломки.

Усталостное выкрашивание рабочих поверхностей зубьев – один из наиболее распространённых видов разрушения шестерён. В результате длительного действия переменных по величине контактных напряжений на рабочих поверхностях зубьев возникают усталостные трещинки, развитие которых приводит к отделению частиц металла. образо-

вавшиеся очаги разрушения, называемые питтингами, представлены на рис. 1.



а



б

Рис. 1. Питтинги на рабочей поверхности зубьев шестерён: а – начальная стадия; $\times 1/3$, б – значительное выкрашивание (указано стрелкой); $\times 3/4$

Образованию питтингов способствуют дефекты макроструктуры (поры, неметаллические включения и т.п.), недостаточная твердость и толщина цементованного слоя, попадание в зацепление посторонних частиц и т.п.

Повышения сопротивления выкрашиванию можно достичь оптимальным изменением радиусов кривизны сопряжённых профилей, повышением твердости поверхности зубьев и прочности сердцевины, а также точности изготовления и монтажа зубчатой передачи, правильным выбором смазки, точным соблюдением режимов химико-термической и термической обработки.

Усталостное разрушение зубьев при изгибе возникает от действия переменных многократно повторяющихся (циклических) нагрузок. Выход из строя некоторых видов колёс (ведущие цилиндрические зубчатые колёса автомобиля) по этой причине составляет до 70 % всех поломок. Напряжения изгиба могут достигать значительных величин. Так, в некоторых шестернях коробки передач автомобилей ЗИЛ они превышают 600 МПа [2].

Усталостный излом имеет вид, представленный на рис. 2.



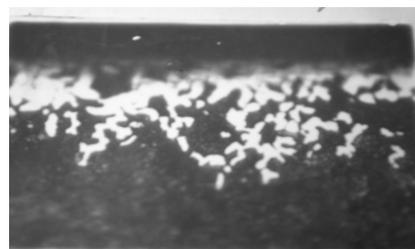
Рис. 2. Усталостное разрушение при изгибе зуба шестерни; $\times 3/4$

На изломе виден очаг зарождения усталостной трещины (отмечен стрелкой) и фронтальные линии её скачкообразного перемещения.

Рис. 3 иллюстрирует разрушение зубьев шестерни из-за усталости при изгибе, вызванное завышенной глубиной нитроцементованного слоя и несоответствием структуры техническим условиям.



а



б

Рис. 3. Нитроцементованная шестерня из стали 25ХГТ: а – разрушение зубьев из-за усталости при изгибе; $\times 1/4$; б – микроструктура нитроцементованного слоя; $\times 400$; (при печати уменьшено в 1,6 раза)

Глубина нитроцементованного слоя составила 2,2–2,3 мм, что почти в 2 раза превышает требуемую глубину (0,8–1,3 мм). Наличие

грубой карбонитридной сетки значительно охрупчивает слой и снижает усталостную прочность при изгибе и контактную выносливость.

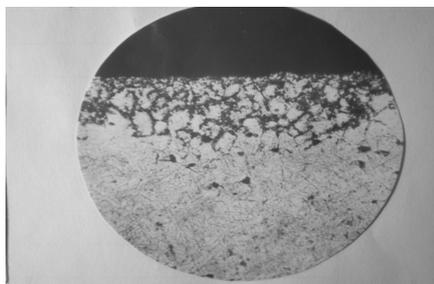
Износ рабочих поверхностей зубьев шестерён, как правило, вызывается недостаточной твердостью поверхностного слоя. Повышенному износу особенно подвержены конические зубчатые колёса.

Причиной пониженной твердости поверхности может быть несоблюдение режимов химико-термической и термической обработки.

На рис. 4, а показан износ зубьев шестерни в результате недостаточной интенсивности охлаждения в процессе закалки и образования, наряду с мартенситом, участков троостита, особенно во впадинах (рис. 4, б).



а



б

Рис. 4. Износ рабочей поверхности зубьев шестерни (а); и структура нитроцементованного слоя (б); а – $\times 1/9$; б – $\times 400$; (при печати уменьшено в 2 раза)

Торцевой износ шестерён коробки передач имеет место в результате периодического переключения передач (рис. 5).

Очень часто на одной шестерне может наблюдаться несколько видов разрушения, вызванных одной и той же или разными причинами.

Разным видам разрушения шестерён могут способствовать заниженная (рис. 6, 7) или

завышенная (рис. 8) глубина цементованного и нитроцементованного слоя.

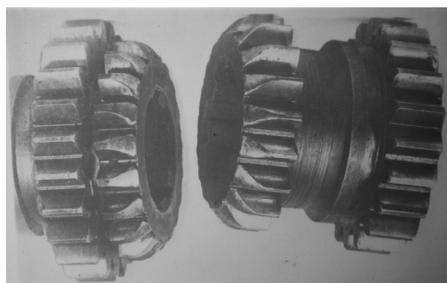


Рис. 5. Торцевой износ шестерён коробки передач; $\times 1/8$

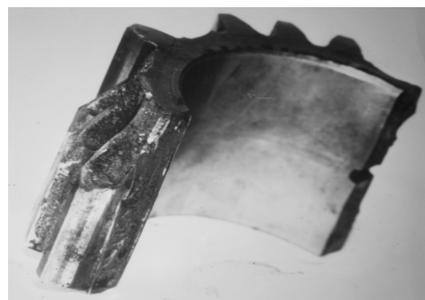


Рис. 6. Разрушение шестерни из-за заниженной глубины цементованного слоя; $\times 1/2$

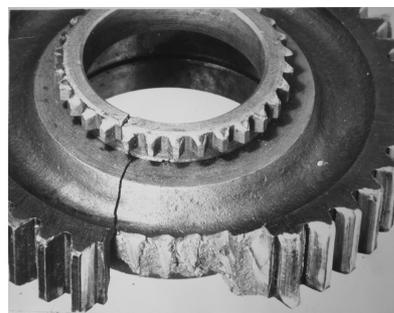


Рис. 7. Разные виды повреждений шестерни коробки передач из стали 25ХГТ вследствие заниженной глубины нитроцементованного слоя; $\times 1/4$

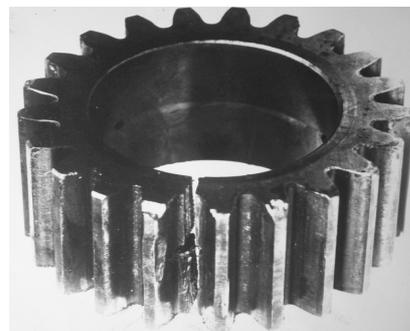


Рис. 8. Повреждения шестерни из-за большой толщины цементованного слоя; $\times 1/2$

Рис. 6 иллюстрирует питтинги, выламывание зубьев и разрушение их торцов в результате заниженной в 2 раза глубины цементованного слоя (0,7 мм вместо 1,4 мм).

На рис. 7 представлена шестерня коробки передач с цементованным слоем заниженной глубины, в результате чего наблюдается износ поверхности зубьев, выкрашивание нескольких зубьев, трещина усталостного характера, зародившаяся во впадине зуба.

На рис. 8 хорошо видны сколы на вершине зубьев шестерни и усталостное разрушение, начавшееся у основания зуба из-за большой толщины цементованного слоя (1,6 мм), что на 0,2 мм превышает требуемую толщину.

Пониженная твердость поверхности и повышенная твердость сердцевины в результате несоблюдения режимов химико-термической и термической обработки приводит к существенным повреждениям шестерён – износу зубьев, питтингам, сколам (рис. 9) и т.п.

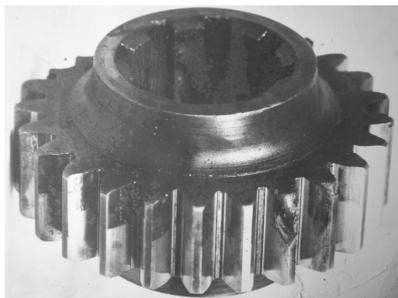


Рис. 9. Повреждения шестерни в результате несоблюдения режимов химико-термической и термической обработки; $\times 1/3$

Повреждения нитроцементованной шестерни из-за нарушения режима закалки показаны на рис. 10.

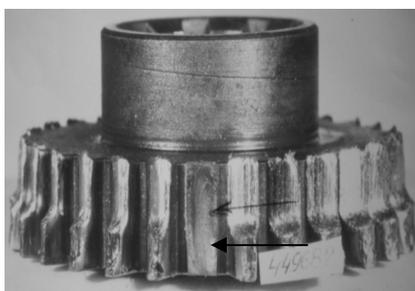


Рис. 10. Износ, разрушение и смятие части зубьев нитроцементованной шестерни из-за неравномерной и некачественной закалки. Один зуб (показан стрелкой) разрушился из-за усталости при изгибе; $\times 1/2$

Увеличение твердости сердцевины свыше 45HRC сопровождается уменьшением остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое и снижением усталостной прочности [2].

Деформация и выработка зубьев шестерён имеет место при пониженной твердости поверхности, которая может быть вызвана нарушениями технологии цементации и нитроцементации, некачественной закалкой.

Несоблюдение режимов закалки или вообще её отсутствие приводит к пониженной твердости и в результате – к интенсивному износу, деформациям и преждевременному разрушению деталей (рис. 10 и 11).



а



б

Рис. 11. Деформация и выработка зубьев шестерни в результате пониженной твердости (а). Полная выработка зубьев шестерни из-за отсутствия закалки после цементации (б); а – $\times 2/3$; б – $\times 1/4$

Мгновенные поломки из-за перегрузок являются очень опасным видом разрушения шестерён. В процессе эксплуатации зубья шестерён могут подвергаться статическому изгибу при максимальном однократном нагружении (при резком торможении, заклинивании, при приложении максимального крутящего момента).

Напряжения при этом могут значительно превысить временное сопротивление стали и привести к внезапному разрушению.

Поломки зубьев шестерён от кратковременной перегрузки представлены на рис. 12 и 14, б. На рис. 13 видны многочисленные косые сколы и поломки под корнем зуба на цементованном венце маховика трактора из стали 25ХГТ, возникшие в результате перегрузки (работа трактора в качестве бульдозера).



Рис. 12. Поломка зубьев шестерни от кратковременной перегрузки; $\times 1/3$

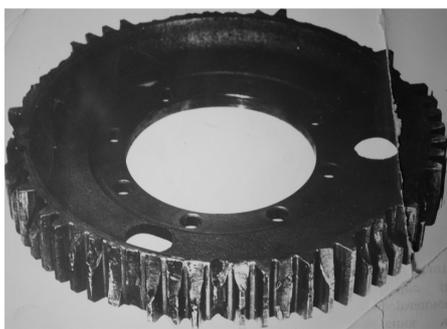
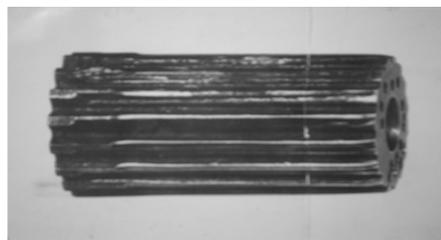


Рис. 13. Разрушение цементованного венца маховика трактора из стали 25ХГТ в результате перегрузки; $\times 1/4$

Значительное превышение временного сопротивления может привести к внезапному



а



б

Рис. 15. Разрушение зубьев шестерён из-за скопления неметаллических включений (а) и скопления пор и повышенного количества неметаллических включений (б); а – $\times 1/2$; б – $\times 1/2$

разрушению. Причиной внезапного разрушения деталей может быть также нарушение условий сборки (перекос при монтаже, удары и т.п.) (рис. 14, а).



а



б

Рис. 14. Разрушение зубьев венца маховика в виде косо́го скола, возможно, инициированное переко́сом при монтаже (а) и поломка зубьев шестерни под корнем (б) вследствие перегрузки; а – $\times 1/2$; б – $\times 1/4$

Внезапные поломки зубьев шестерён могут происходить при нагрузках, не превышающих допустимых, из-за дефектов металлургического происхождения (рис. 15) или неправильно проведенной термической (химико-термической) обработки.

Выводы

Выполненные исследования показали, что чаще всего разрушение шестерён тракторов и бульдозеров имеет усталостный характер (при изгибе и контактных нагрузках). Наблюдается также износ рабочей поверхности, значительные деформации и выработка зубьев, внезапные поломки.

Причинами таких разрушений являются дефекты макроструктуры металла, некачественно выполненная химико-термическая или термическая обработка, неправильная сборка, перегрузки в процессе эксплуатации.

Для обеспечения надёжной и долговечной работы шестерён необходим рациональный подход к их конструированию. Повышения статической и усталостной прочности при изгибе можно достичь за счёт увеличения опасного сечения, снижения концентрации напряжений в переходной части ножки зуба (увеличение радиуса выкружки, обработка дробью поверхности зубьев в зоне действия максимальных напряжений и т.п.).

Необходимо производить тщательный металлургический контроль заготовок шестерён, точно соблюдать режимы термической и химико-термической обработки, в частности строго контролировать глубину упрочнённого слоя.

Для предотвращения внезапных поломок нужно следить за правильностью монтажа зубчатых соединений и свести к минимуму перегрузки в процессе эксплуатации.

Литература

1. Дьяченко С.С. Материаловедение: учебник / С.С. Дьяченко, И.В. Дощечкина, А.А. Мовлян, Э.И. Плешаков. – Харьков : ХНАДУ, 2010. – 464 с.
2. Башнин Ю.А. Технология термической обработки: учебник для вузов / Ю.А. Башнин, Б.К. Ушаков, А.Г. Секей. – М.: Металлургия, 1986. – 424 с.
3. Фрактография и атлас фрактограмм: справочник / пер. с англ. ; под ред. Дж. Феллоуза. – М. : Металлургия, 1982. – 490 с.
4. Балтер М.А. Фрактография – средство диагностики разрушенных деталей / М.А. Балтер, А.П. Любченко, С.И. Аксёнова и др. – М. : Машиностроение, 1987. – 160 с.
5. Anteins A. Mašinu metalô detalû lûzumi / A. Anteins, J. Rotbaums. – Riga: Izdevnieciba «Liesma». – 1976. – 52 с.

Рецензент: С.С. Дьяченко, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 7 сентября 2011 г.