
НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 621.9+629.33

ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ И ГОРНЫХ МАШИН

© 2024 г. С. С. Чибухчян^{1,*}, О. С. Чибухчян¹, Г. С. Чибухчян¹

¹Национальный политехнический университет Армении, Ереван, Армения

*e-mail: armenpack@mail.ru

Поступила в редакцию 18.10.2023 г.

После доработки 11.12.2023 г.

Принята к публикации 15.12.2023 г.

Приведены характеристики тонкостенных образцов из алюминиевого сплава марки 8011 и нержавеющей стали марки X18H9T после двустороннего ультразвукового упрочнения поверхностного слоя. Представлены зависимости изменения пределов текучести и относительных удлинений слоев образца из алюминиевого сплава марки 8011 и нержавеющей стали марки X18H9T после их разрыва от глубины упрочненного слоя. Приведены результаты экспериментов на разрез образца с ультразвуковым упрочнением. Определен коэффициент повышения осевой прочности образцов после ультразвукового упрочнения. Представлены микроструктуры разреза образца из алюминиевого сплава марки 8011 без двустороннего ультразвукового упрочнения и с упрочнением. Показано, что микроструктура после двустороннего ультразвукового упрочнения изменяется, появляются наноструктуры на глубине 20–30 мкм, размеры частиц составили 40–80 нмк.

Ключевые слова: транспорт, горные машины, прочность, ультразвуковое упрочнение, наноструктура

DOI: 10.31857/S0235711924020043, EDN: QWINDQ

Современное транспортное машиностроение является одной из ведущих отраслей экономики, обеспечивая мультипликативный эффект развития ряда отраслей и, в частности, инновационных технологий производства и применения новых материалов для деталей и агрегатов силовой установки, трансмиссии, кузовных элементов. Новые, более жесткие требования экологической безопасности, технологичности и эффективности производства заставляют применять новые материалы и технологии по повышению механических свойств материалов деталей.

Применение инновационных технологий в транспортном машиностроении позволяет обеспечить современные транспортные средства и горные машины такими качествами, как: улучшенная энергоэффективность и повышенные экологические показатели; энергосбережение, электрификация, интеллектуальные системы безопасности и управления; технологии информатизации и компьютеризации; технологии экологической, пассивной, активной безопасности и рециклинг; новые гибкие и адаптивные производственные технологии; расширение

применения новых конструкционных и эксплуатационных материалов (снижение массы транспортных средств).

Для транспортных средств различного назначения современные реалии диктуют новые требования снижения веса как отдельных агрегатов и механизмов, так и транспортного средства в целом, что позволяет непосредственно влиять на снижение эксплуатационных расходов и повышение технико-эксплуатационного качества. В связи с этим производители и разработчики транспортных средств на практике применяют разные легкие материалы и компоненты.

Легкие материалы, такие как высокопрочная сталь, алюминий, магний, углепластик, листовой формовочный композит и термопластичный полиолефин, позволяют увеличить пробег электромобилей на одной зарядке и сократить выбросы выхлопных газов у автомобилей с двигателями внутреннего сгорания (ДВС). При более глубоком подходе к замене деталей на облегченные (выпускной тракт, сиденья, маховик и др.) можно уменьшить массу автомобиля на 150–200 кг [1].

Одним из основных направлений развития материалов для кузова и других деталей транспортных средств является увеличение объема применения высокопрочных сталей в целях повышения безопасности и снижения массы транспортного средства. Необходимость снижения массы диктуется постоянным ужесточением экологических требований по уменьшению вредных веществ в выхлопе автомобиля [2].

В ближайшее десятилетие производители транспортных средств будут ускоренными темпами переходить от традиционных материалов, например, высокопрочной стали к ее инновационной версии, алюминию, пластику и композитным материалам. Снижение веса транспортных средств, например электромобилей, позволит увеличить их пробег на одной зарядке и сократить выбросы и расход топлива у автотранспортных средств с ДВС, в частности горных машин.

Сегодня также исследуются возможности повышения показателей надежности с учетом разных эксплуатационных факторов горных машин и автотранспортных средств [3].

Многие детали разных агрегатов и механизмов двигателя и трансмиссии транспортных средств, горных машин, систем управления, несущих систем, рабочего оборудования и кузова в процессе эксплуатации находятся в сопряжении с другими деталями, что приводит их к предельному состоянию из-за изнашивания. В результате этого происходит повышенный износ и в дальнейшем разрушение материала (рис. 1). Отрыв отдельных частиц и элементов от поверхности твердого тела, накопление его остаточной деформации при трении в итоге приводят к естественному постепенному изменению размеров, формы детали, что требует ремонта детали или ее замены.

Условия работы горных машин отличаются повышенным содержанием абразивных частиц и запыленностью воздуха, частым резким изменением динамических и тепловых нагрузок на детали двигателя, ходовой части, рабочего оборудования. Воздействие этих факторов ухудшает условия работы сопряженных элементов, вызывая определенные виды отказов вследствие перегрузок, усталостных явлений, действия силы трения и др.

В процессе работы машин под воздействием высоких нагрузок и внешней среды в результате изнашивания происходят изменения геометрических параметров, формы и массы в элементах ответственных деталей, узлов и агрегатов, что непосредственно влияет на эксплуатационные показатели работы машины.

Основным способом восстановления размеров и формы деталей является нанесение ремонтных покрытий (наплавка, напыление, гальваническое осаждение и др.) с последующей механической обработкой для обеспечения требуемой формы и размеров.

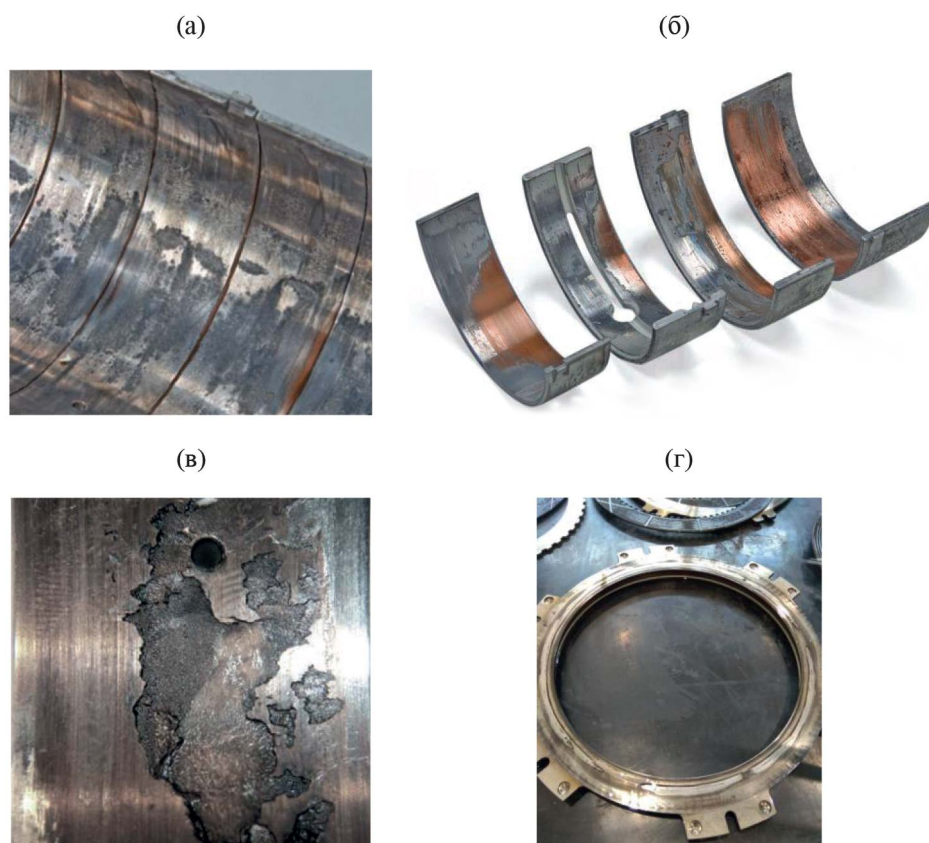


Рис. 1. Виды повреждений. Изношенные поверхности подшипников скольжения двигателя: (а) — рабочая изношенная поверхность; (б) — неравномерный износ; (в) — поврежденная рабочая поверхность подшипника скольжения; (г) — перегретые и изношенные диски пакетов автоматической коробки передач карьерных самосвалов.

В настоящее время эффективными методами по повышению износостойкости деталей и снижению изнашивания являются повышение прочности материала детали и ее поверхностной твердости с одновременным снижением шероховатости слоя трения. Такими технологиями, в частности, являются: изменение состава и структуры поверхностного слоя материала детали, нанесение износостойких покрытий и специальная финишная обработка поверхностей. Повышению механических свойств деталей с разными технологиями, в том числе с применением ультразвука, посвящены многие работы [4–8].

Большое влияние на эксплуатационные свойства восстанавливаемых деталей транспортных средств оказывает формирование и строение поверхностного слоя, расположенного под обработанной поверхностью и контактирующего с сопряженной деталью в процессе эксплуатации. Процессы, происходящие в поверхностных слоях, связанные с наклепом и разупрочнением, с повышением микротвердости и образованием остаточных напряжений, в итоге оказывают решающее влияние на эксплуатационные свойства деталей, в частности на работоспособность и надежность. Особенно сильное влияние на качество поверхностного слоя деталей

оказывает механическая обработка поверхности после наплавки, так как высокая твердость и прочность поверхностного слоя после наплавки приводит к резкому износу и поломкам традиционного лезвийного инструмента из твердых сплавов и металлокерамики. Кроме того, высокие силы резания и температуры приводят к образованию остаточных напряжений большой величины. Значительное влияние на износ и усталостную прочность имеет также знак, величина и глубина залегания поверхностных остаточных напряжений.

Основным источником возникновения остаточных напряжений в поверхностном слое является высокая теплонапряженность процесса механической обработки. Чем выше прочностные свойства обрабатываемого материала, тем более значительные тепловые потоки воздействуют на обрабатываемую деталь.

В настоящее время исследования в области ультразвукового (УЗК) пластического поверхностного деформирования (ППД) деталей машин проводятся в целях повышения их эксплуатационных характеристик [7, 9–15] и осуществляются ультразвуковым упрочнением их рабочих поверхностей с одной стороны, при этом, согласно известным результатам В.П. Алехина [5], на глубине 25–40 мкм создается наноструктура, которая способствует значительному повышению износостойкости рабочих поверхностей таких деталей. Таким образом, если деталь тонкостенная, то ее двустороннее ультразвуковое упрочнение может способствовать еще большему увеличению ее механических характеристик. До настоящего времени такие исследования не проводились, этим и обусловлена актуальность исследования.

Целью исследования является разработка способа ультразвукового двустороннего упрочнения тонкостенных листовых материалов для деталей транспортных средств, который позволит получить заготовки в виде упрочненных с двух сторон листовых материалов, из которых методами обработки давлением изготавливают тонкостенные детали машин.

С целью исследовать влияние УЗК ППД на механические свойства многослойного материала были изготовлены соответствующие образцы толщиной 20 мкм, согласно ГОСТ 618–2014, из материалов алюминиевого сплава марки 8011 и нержавеющей стали марки X18H9T. Образцы после обработки двусторонним УЗК были испытаны на разрыв в целях определения временного сопротивления, модуля Юнга, предела текучести и сравнительного удлинения. На этих данных были построены экспериментальные зависимости временного сопротивления и относительного удлинения от глубины упрочнения.

На основе проведенных исследований установлены экспериментальные зависимости изменения пределов текучести и относительных удлинений слоев после их разрыва от глубины упрочненного слоя для материала из алюминиевого сплава марки 8011 и нержавеющей стали марки X18H9T.

Экспериментальные исследования проведены с применением современных разрывных машин марок Tira Test 2300 и HOUNSFIELD HKS5 с компьютерным интерфейсом, которые позволяют измерять и регистрировать предел текучести, предел прочности, модуль Юнга и относительное удлинение испытываемых образцов до разрыва в реальном времени и осуществлять сбор экспериментальных результатов в отдельном файле. Для изучения зернистости структуры образцов до и после эксперимента использован микроскоп ZEISS AXIO VERT A1 с 1000-кратным увеличением. Виртуальные исследования проведены посредством программной среды ANSYS Multiphysics.

Виртуальные исследования показывают, что временное сопротивление в зависимости от глубины упрочненного слоя сначала снижается до середины разреза образца, а потом увеличивается до максимального значения. При этом чем больше значения параметров, определяющих пластические свойства исходного материала, тем выше сравнительное удлинение и пластичность тонкостенной детали после

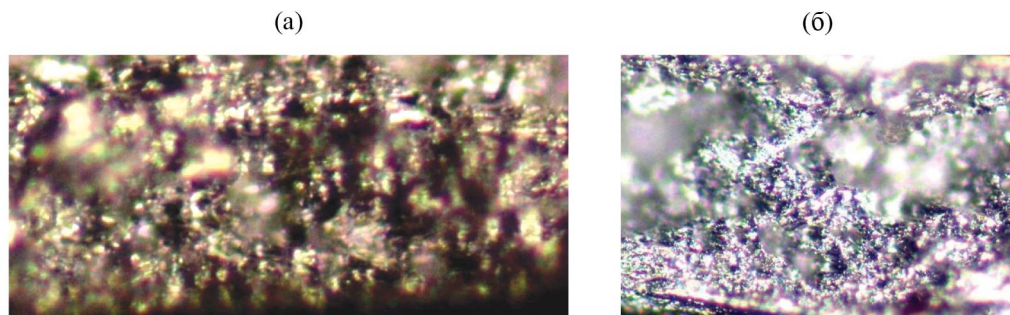


Рис. 2. Общий вид среза разреза образца из алюминиевого сплава марки 8011: (а) — без двустороннего УЗК упрочнения, с увеличением $\times 1000$; (б) — после двустороннего УЗК упрочнения, с увеличением $\times 1000$.

двустороннего УЗК. Сравнительное удлинение слоев увеличивается в два и более раза. Это возможно при появлении наноструктурных образований. С этой целью были сняты разрезы образцов с увеличением $\times 1000$ (рис. 2).

Измерения показали, что в исходном материале размеры частиц находятся в пределах 2–5 мкм для образца из алюминиевого сплава марки 8011, после двустороннего УЗК размеры частиц составили 40–80 нмк, при этом структуры с минимальными размерами появляются в начале второго слоя. Это доказывает известную теорию о появлении наноструктуры на глубине 20–30 мкм.

Такую же картину получаем и для образцов из материала Х18Н9Т с разницей, что в этом случае размеры наноструктуры находятся в пределах 70–100 Нм.

Результаты испытаний на срез образцов с двусторонним ультразвуковым упрочнением и без упрочнения показаны в табл. 1.

На основе полученных результатов можно определить, что во всех случаях в зависимости от материала двустороннее УЗК упрочнение позволяет повысить осевую жесткость до 22–36.7%, при этом чем выше пластические свойства материала, тем выше значения полученного коэффициента.

После двустороннего УЗК упрочнения по результатам экспериментальных исследований было определено также теоретическое значение коэффициента прочности K тонкостенной детали при осевом растяжении, результаты которой представлены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, при двустороннем УЗК упрочнении коэффициент повышения осевой прочности увеличивается на 19.6–27.6%.

Таблица 1. Результаты экспериментов на разрез образцов УЗК упрочнением

Материал многослойного образца	Сила среза, H		Коэффициент увеличения осевой жесткости упрочненных образцов с УЗК
	без обработки УЗК	с двусторонней УЗК обработкой	
Алюминиевый сплав марки 8011	613.2	838.46	1.367
Нержавеющая сталь марки Х18Н9Т	4200.0	5524.5	1.315

Таблица 2. Теоретические результаты на разрез образца с УЗК упрочнением

Материал многослойного образца	Сила среза, H		Коэффициент повышения осевой прочности упрочненных образцов
	без УЗК упрочнения	двустороннее УЗК упрочнение	
Нержавеющая сталь марки X18H9T	4350	5513	1.268

Закключение. На основании проведенных исследований установлены экспериментальные зависимости изменения пределов текучести и относительных удлинений слоев после их разрыва от глубины упрочненного слоя. Установлено, что предел текучести в зависимости от глубины упрочненного слоя вначале уменьшается до срединного сечения, после чего увеличивается до своей наибольшей величины. Установлено также, что чем больше предел текучести упрочненного слоя, тем больше его относительное удлинение. Показано, что при одностороннем УЗК упрочнении коэффициент повышения осевой прочности увеличивается на 9.8–13.8%, а при двустороннем упрочнении – до 50%, с одновременным увеличением их пластичности, что дает возможность значительно улучшить условия штамповки сложных деталей транспортных и горных машин из таких пластин.

Финансирование работы. Работа выполнена без финансовой поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://abiznews.net/novosti/snizhenie-vesa-avtomobiley-vzov-i-vozmozhnosti-dlya-proizvoditeley-lakokrasotchnh-pokrtiy/>
2. Кудрявцев С. М., Пачурин Г. В., Соловьев Д. В., Власов В. А. Основы проектирования, производства и материалы кузова современного автомобиля: Монография: Под общей редакцией С. М. Кудрявцева. Н. Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, 2010. 236 с.
3. Чибухчян Г. С., Стакян М. Г., Чибухчян О. С. Повышение несущей способности элементов конструкций транспортных средств по критерию коррозионной прочности // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2019. № 6. С. 91. <https://doi.org/10.1134/S0235711919060038>
4. Абрамов О. В., Хорбенко И. Г., Швецла Ш. Ультразвуковая обработка материалов. М.: Машиностроение, 1984. 280 с.
5. Алехин В. П. Получение нано- и субмикроструктурных структур в сталях с использованием ультразвуковой технологии // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2012. № 8. С. 68.
6. Баласанян Б. С., Агбалян С. Г., Захарян А. А., Баласанян Б. А., Чибухчян О. С. О возможности повышения прочности и пластичности титановой фольги с ультразвуковым упрочнением ее поверхностей // Вестник НПУА. Механика, машиноведение, машиностроение. 2018. № 2. С. 76.
7. Палаев А. Г., Потапов А. И., Максarov В. В., Палаев Н. А. Технология, оборудование ультразвуковой упрочняюще-финишной обработки металлов и контроль качества // Станки и оборудование. 2011. № 6 (66). С. 37.
8. Панин В. Е., Сергеев В. П., Панин А. В. Наноструктурирование поверхностных слоев конструкционных материалов и нанесение наноструктурных покрытий. Томск: Изд-во. ТПУ, 2008. 286 с.
9. Зайцев К. В., Аралкин А. С. Применение ультразвука при обработке углеродистых сталей и титановых сплавов // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 3. С. 659.

10. *Lebedev V.A., Kochubey A.A., Kirichek A.V.* The use of the rotating electromagnetic field for hardening treatment of details // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. V. 177. P. 1.
11. *Long Y., Li Y., Sun J., Ille I., Li J., Twiefel J.* Effects of process parameters on force reduction and temperature variation during ultrasonic assisted incremental sheet forming process // Int. J. of Advanced Manufacturing Technology. 2018. V. 97. P. 13.
12. *Megson T.H.G.* Aircraft Structures for Engineering Students. 6th edn. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2016. 910 p.
13. *Nima N., Majid R., Ramin H., Saeid A.* Improved microstructure and mechanical properties of sheet metals in ultrasonic vibration enhanced biaxial stretch forming // J. of Theoretical and Applied Vibration and Acoustics. 2019. V. 5 (1). P. 1.
14. *Ochi Y., Masaki K., Matsumura T., Sekino T.* Effect of shot-peening treatment on high cycle fatigue property of ductile cast iron // Int. J. of Fatigue. 2001. V. 23. P. 441.
15. *Bo Wu, Pangpang W., Young Sh., Jianxun Zh., Ri M.* Effect of ultrasonic nanocrystal surface modification on the fatigue behaviors of plasma-nitrided S45C steel // Surface and Coatings Technology. 2012. V. 213. P. 271.