

С.Нураков¹, М.А.Белоцерковский², А.Ж.Аяганова¹

¹Евразийский национальный университет им. Л.Н.Гумилева,
г. Астана, Казахстан

²Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,
г. Минск, Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ ДЕТАЛЕЙ С НАПЫЛЕННЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

Аннотация. Статья посвящена проблеме нанесения износостойких покрытий на детали технологического оборудования и транспортных машин. Выявлена разница в значениях усталостной прочности металла, причинах снижения сопротивления металла. Дана рекомендация по оптимальному решению проблемы. На ремонтных предприятиях при наплавке коленчатых валов имеет место низкая пластичность в зоне сплавления между шейками и галтелями. В результате возникают трещины и снижается сопротивление усталости металла. Наиболее перспективными методами напыления являются плазменное и гиперзвуковое газопламенное напыление. Испытания проводились на машине МУ-6000 на образцах, напыленных традиционной электродуговой, высокоскоростной плазменной и гиперзвуковой газопламенной металлизацией, а также электродуговой наплавкой. В результате выявлена весьма ощутимая разница в значениях усталостной прочности. Установлено, что снижение пластичности в зоне сплавления наплавки с основой служит причиной снижения сопротивления усталости, а методы нанесения покрытий напылением имеют существенные преимущества и перспективны для их применения взамен наплавки.

Ключевые слова: усталость металла, износостойкость металла, наплавка, разрушение конструкции, плазменное напыление, гиперзвуковая металлизация.

Түйіндеме. Кезінде жөндеу ұйымдарында кеңінен қолданған иінді біліктерді балқыту әдістерін кезінде мойындар мен галтельдер пайдалыну арасындағы аймақтарда иілімділігі өте төмен екені байқалады. Осының

нәтижесінде жарықтар пайда болып, шаршау кедергісі төмендейді. Осы орайда, мақала авторлары зерттейтін бұрқу әдістерінің ішіндегі плазмалы және гипердыбысты түрлерінің келешегі мол екенін анықтайды. Көлік және жұмыс машиналарында айнымалы күштер, егжей соғулар және жігерлі үйкелістер әсерінен көптеген бөлшектерге ауыр жүктеме түседі. Нәтижесінде бұзылуға әкеліп соғатын шаршау зақымдары жинақталады. Жалпылама шаршау диаграммасында шаршау салдарынан істен шығу процессінің үлгісі көрсетілген. Жабындардың дәстүрлі электр доғалы, жоғары жылдамдықты плазмалық және гипердыбысты металдандыру және электр доғалық дәнекерленген арнайы үлгілерінде сынақтар жүргізілген. Осы сынақтардың нәтижелері жабындарды бұрқу кезінде төзімділіктің шамалы төмендеуіне (10-13 %) алып келетінің көрсетті, ал балқыту кезінде бұл көрсеткішіндекі 35-40 %-дан төмен болды. Осыдан қорытынды иілімділігі төмен аймағында шаршау қарсылығының төмендеуін туғызады, және бұрқу әдістерін жабындарды жасауға пайдаланудың келешегі мол деп қорытынды жасалды.

Түйінді сөздер: шаршау, жарық, микроқұрылым, балқыту, бұзылу, металлизация, плазмалы, гипердыбысты металлизация.

Abstract. The article is dedicated to the issue of application of wear-resistant coatings on the details of technological equipment and transport vehicles. Purpose of the work is to identify the difference in values of the endurance strength of metal, reasons of metal's resistance reducing and recommendation of the optimal solution of the problem. There was typically low plasticity in the area of alloyage between journal and fillet in the repair shops at the crankshafts surfacing. As a result the cracks appeared and reduced the endurance strength of metal. It was identified that the most promising methods of spraying - plasma and plasma flame spraying. The tests were carried out on the machine MU-6000 on the samples sprayed with the traditional electric-arc, high-speed plasma and superaerodynamic flame plating, as well as arc surfacing. As a result it was identified the significant difference in the values of the permanent stability. The conclusion - reduction of plasticity in the area of the surfacing alloyage with the base stock causes reduction of the endurance strength, but the coating by spraying has significant advantages and promising for their application instead of surfacing.

Key words: fatigue of metal, wearability of metal, surfacing, structural failure, plasma spraying, superaero dynamic metal coating.

Введение. Известно немало публикаций, посвящённых технологическому процессу нанесения износостойких покрытий на детали транспортных машин и технооборудования, эксплуатирующихся в условиях, вызывающих усталостное разрушение ме-

талла, но недостаточно внимания уделяется данным по их усталостной прочности и способам восстановления деталей методом напыления. Согласно имеющимся данным при использовании методов наплавки коленчатых валов в среде CO_2 под слоем флюса и т.п. без последующей термообработки на галтелях между шейками и щеками образующаяся зона сплавления имеет низкую пластичность. В зоне термического влияния из-за резкой структурной неоднородности (на шейках мартенсит с твердостью 60 HRCэ, на щеках – перлит с твердостью 170 HB) возникают трещины, микротрещины, усиливается концентрация напряжений, снижается сопротивление усталости. При этом вследствие значительного термического влияния (глубина проплавления около 2 мм) происходит деформация вала. Таким образом, несмотря на то, что в наплавленном слое образуется структура мартенсита, обеспечивающая сжимающие напряжения, низкая пластичность в зоне сплавления служит основной причиной снижения сопротивления усталости. При этом отмечается, что отрицательно воздействовать на сопротивление усталости могут растягивающие напряжения, вызванные различными коэффициентами термического расширения у основы и наплавляемого материала.

Анализ проблемы. В работе [1] отмечается, что по сравнению с коленчатыми валами, восстановленными наплавкой, износостойкость шеек с покрытиями, полученными плазменным напылением, значительно выше и приближается к новым. В связи с этим автор рекомендует постепенно заменять методы электродуговой наплавки на технологию "холодного" напыления. Одними из первых среди "холодных" методов напыления для восстановления шеек коленчатых валов были использованы электродуговая металлизация и плазменное напыление [2]. Испытания напыленных высокоскоростным плазменным методом штоков гидроцилиндров, выполненных под руководством автора статьи, показали, что их износостойкость не ниже износостойкости новых [3].

Практически равную с новыми валами долговечность обеспечивает метод активированной электродуговой металлизации [4].

Причем наилучшие результаты достигаются при насыщении напыленной поверхности металлоплакирующей смазкой, содержащей MoS_2 [5].

В периодической зарубежной научно-технической литературе вопросам эксплуатации восстановленных коленчатых валов уделяется значительно меньше внимания. Это объясняется прежде всего экономическими, а не техническими причинами и наличием широкой сервисной сети, оснащенной любыми запасными частями, высоким уровнем жизни, а также относительно малым сроком эксплуатации автомобилей до покупки следующей новой модели, что обуславливают крайне редкое применение восстановительных технологий при ремонте двигателей. Тем не менее имеющиеся данные свидетельствуют о том, что восстановленные коленчатые валы обладают достаточно большой долговечностью. Так, по данным американской фирмы "CRP Industries" [6], после восстановления коленчатых валов двигателей некоторых марок уникальных автомобилей методом электродуговой металлизации срок их службы составил около 0,9 по сравнению с новыми.

Усталость металла. Многие детали транспортных машин и технологического оборудования (коленчатые валы, подпятники, сферические сопряжения, диски сцепления и т.п.) нагружаются периодическими силами, вызывающими знакопеременные крутящие и изгибающие моменты, которые обуславливают появление крутильных, продольных и поперечных колебаний. В различных зонах таких деталей происходит интенсивное накопление усталостных повреждений и зарождение трещин. В дальнейшем по мере увеличения количества циклов нагружений усталостная трещина распространяется все дальше от места зарождения, становясь эффективным концентратором напряжений, что приводит к быстрому разрушению детали.

Усталостное разрушение является сложным процессом, и для материалов, используемых при изготовлении большинства восстанавливаемых деталей, может характеризоваться периодами, изображенными на диаграмме (рис. 1). В нашем случае целесообразно рассматривать область диаграммы от предела

усталости σ_w до критического напряжения σ_k , выше которого уже в начале испытаний возникают субмикроскопические трещины как по телу зерен материала, так и по их границам [7] .

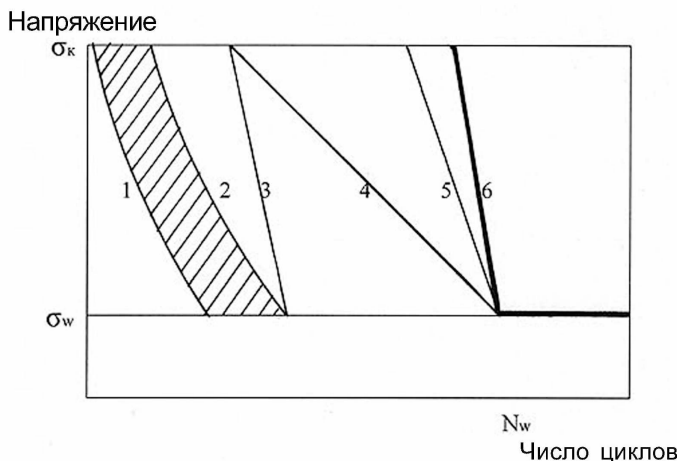


Рис. 1. Схема обобщенной диаграммы усталости:
 1, 2 – начало и конец микроскопического течения;
 3 – начало образования субмикроскопических трещин
 (кривая необратимой повреждаемости); 4 – начало обра-
 зования микроскопических трещин; 5 – начало катастро-
 фического разрушения (долома); 6 – кривая усталости;
 N_w – базовое число циклов

Можно отметить, что основными факторами, снижающими сопротивление металла усталостному разрушению, являются нерациональность конструкции, и концентраторы напряжений, создающие повышенные эксплуатационные напряжения и снижающие работоспособность деталей и изделий. Возникающие в металле микротрещины, как правило, не выявляются общепринятыми методами неразрушающего контроля и со временем развиваются непрогнозируемо, в конечном итоге соединяясь в сквозную макротрещину. Данной теме посвящены многие работы, рассматривающие случаи повреждения изделий при воздействии переменных нагрузок и сероводородсодержащих сред, и

образования сквозных повреждений, возникающих в металле в процессе длительной эксплуатации [8-10].

Процесс усталостного разрушения представляет собой неразрывную последовательность нескольких подготовительных периодов, следующих и вытекающих один из другого [7]. Так, развитие усталостной трещины невозможно до тех пор, пока вся поверхность опасного сечения не будет покрыта сетью полос скольжения, подготавливающих путь магистральной трещине, а появление полос скольжения невозможно без протекания процессов циклической микротекучести и текучести и т. д. Отсюда следует, что в случае ускорения или задержки одного из периодов дальнейшее накопление повреждений убыстряется или замедляется, т. е. предел усталости может также уменьшаться или увеличиваться. Исходя из этого можно предположить, что любой метод нанесения покрытий, сопровождающийся нагревом восстанавливаемой детали до температур, способствующих интенсивному движению дислокаций или любым изменениям микроструктуры, должен вызвать снижение предела усталости.

Проведение усталостных испытаний. Исследование характеристик сопротивления усталостному разрушению образцов с покрытиями регламентировано ГОСТ 25.502-79 и ГОСТ 25.502-82. Покрытия наносились традиционной электродуговой, высокоскоростной плазменной и гиперзвуковой металлизацией, электродуговой наплавкой того же материала.

Испытания осуществлялись на машине типа МУИ-6000, обеспечивающей жесткое нагружение при чистом изгибе вращающегося образца (рис. 2). Предельное значение нагрузки на образец – 800 Н, наибольший изгибающий момент – 50 Н·м, частота изменения цикла испытательной нагрузки – 6000 об./мин. За базу испытаний принято 10^7 циклов. Для испытаний используются цилиндрические образцы из стали 40Х, с диаметром рабочей части образцов 10 мм, длиной 100 мм.

Основными критериями при определении пределов выносливости и построении кривых усталости являются полное разрушение и появление макротрещин заданного размера. В интервале напряжений 0,95...1,05 от предела выносливости, со-



Рис. 2. Машина МУИ-6000

ответствующего вероятности 50 %-ного разрушения, испытывалось по 4 образца, при этом не менее 2-х из них не должны были разрушаться до базы испытаний.

Результаты испытаний сопротивления усталости образцов с покрытиями (сталь 40x13), полученными традиционной электрометаллизацией, высокоскоростной плазменной и гиперзвуковой металлизацией и электродуговой наплавкой, приведены на рис. 3.

Выводы

Анализ полученных данных показывает, что покрытия, нанесенные гиперзвуковой, высокоскоростной плазменной металлизацией и традиционной электрометаллизацией, вызывают незначительное снижение предела выносливости (10-13 %). После вибродуговой наплавки предел выносливости снизился на 35-40 %. Таким образом, при испытании образцов с различными покрытиями выявлена весьма ощутимая разница в значениях усталостной прочности. Отсюда можно сделать вывод о том, что при всех способах наплавки отрицательное влияние на сопротивление усталости оказывают растягивающие напряжения, вызванные различными коэффициентами термического расширения у основы и у наплавляемых материалов, структурными превращениями в наплавляемом металле и зоне термовлияния.

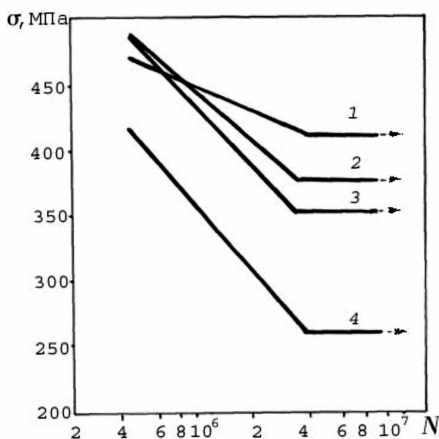


Рис. 3. Кривые усталости образцов: 1 – без покрытия; 2 – с гиперзвуковыми покрытиями; 3 – с плазменными покрытиями; 4 – с электроразрушающими покрытиями; 5 – с наплавленными покрытиями

Кроме того, несмотря на образование в наплавленном слое структуры мартенсита, обеспечивающей сжимающие напряжения, низкая пластичность в зоне сплавления покрытия с основой может служить главной причиной снижения сопротивления усталости.

Список литературы

1 Соловьев Б.М. Обоснование технологического процесса получения покрытий плазменным напылением // Автомобильный транспорт. – 1990. – № 3. – С. 53.

2 Ермаков С.А. Опыт технологических работ в области восстановительной и упрочненной наплавки. Технология ремонта, восстановления, упрочнения и обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций: Матер. 3-й Всерос. практ. конф.-выставки, г. Москва, 7 мая 2001 г. – М.: Наука, 2001. – С.110-112.

3 Нураков С., Томашец А.К., Савинкин В.В. Применение метода плазменного напыления для восстановления истоков гидроцилиндров: матер. Респ. науч.-техн. конф. // "Казыбаевские чтения". – Петропавловск: СКГУ, 2006. – С. 82-84.

4 Нураков С., Белоцерковский М.А., Аяганова А.Ж. Создание новых ресурсо- и энергосберегающих технологий для нанесения износостойких покрытий на поверхности изделий машиностроения методами напыления // Вестн. ЕНУ им.Л.Н.Гумилева. – 2015. – № 6. – С. 150-153.

5 Пантелеенко Ф.И., Гузов В.Ф., Сороговец В.И., Лисовский А.Л. Исследование износостойкости восстановленных коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания // Оборудование, материалы и технологии упрочнения и восстановления деталей машин. – Новополюцк: ПГУ, 2001. – С. 373-376.

6 Grankshaft repaired at 30 % saving // Welding Journal. – 1999. – Vol. 58, № 2. – P. 710-715.

7 Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 2004. – 264 с.

8 Wilkinson A.J., Roberts S.G., Hirsch H.B. Modelling the threshold conditions for propagation of stage I fatigue cracks // Acta mater. – 1998. – Vol. 46. – P. 379-390.

9 Хокинс М., Васантасри В., Сидки П. Металлические и керамические покрытия. – М.: Мир, 2000. – 516 с.

10 Кушнарченко В. М., Чирков Ю.А., Репях В.С., Ставищенко В.Г. Усталостные разрушения деталей нефтегазового оборудования // Вестник ОГУ. – 2012. – № 4 (140). – С.277-278.