

МЕТОДИКИ И ОБРАЗЦЫ ДЛЯ СРАВНИТЕЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ ДЕТАЛЕЙ С МНОГОСЛОЙНОЙ НАПЛАВКОЙ

И. А. РЯБЦЕВ¹, В. В. КНЫШ¹, А. А. БАБИНЕЦ¹, С. А. СОЛОВЕЙ¹, И. К. СЕНЧЕНКОВ²

¹ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Институт механики им. С. П. Тимошенко НАН Украины. 03057, г. Киев, ул. Нестерова, 3

Разработаны конструкция образцов и методики экспериментальной оценки усталостной долговечности многослойных наплавленных образцов при циклическом механическом нагружении. Конструкция образцов имитирует конструкцию реальных наплавленных деталей, что позволяет выполнять сравнительную оценку влияния химического состава основного металла и наплавленных слоев, а также техники и технологии наплавки отдельных валков или слоев на их усталостную долговечность. Для исследований усталостной долговечности образцов были выбраны соответствующие схемы нагружения, которые с определенными допущениями воспроизводят циклические силовые нагрузки, характерные для реальных деталей: крупномодульных шестерён, нажимных винтов прокатных станов, прокатных валков, роликов МНЛЗ и т. д. Приведены результаты экспериментальных исследований циклической долговечности образцов по предлагаемым методикам. Установлено, что разработанные методики исследований целесообразно использовать для оценки усталостной долговечности различных деталей при выборе материалов, техники и технологии восстановительной или изготовительной многослойной наплавки. Библиогр. 11, табл. 1, рис. 8.

Ключевые слова: дуговая наплавка, многослойная наплавка, методика усталостных испытаний, усталость, циклическая долговечность, конструкция многослойного образца

Показатели усталостной долговечности являются одной из важнейших характеристик наплавленных деталей, которые эксплуатируются в условиях циклических нагрузок. Особенно остро эта проблема стоит при восстановлении изношенных деталей методами наплавки. Эти детали уже прошли определенный период эксплуатации и исчерпали часть ресурса, заложенного при их конструировании и изготовлении. При выборе наплавочных материалов и разработке технологии восстановительной наплавки таких деталей необходимо оценивать влияние предварительной наработки на остаточный ресурс эксплуатации восстановленной детали.

В настоящее время отсутствует общепринятая методика испытаний усталостной долговечности наплавленных образцов при циклических механических нагрузках. Стандартизированные методы испытаний на усталостную долговечность [1–3] сложно адаптировать к условиям эксплуатации, которые характерны для многих наплавленных деталей, поскольку образцы, используемые в данных методиках, имеют либо цилиндрическое сплошное (толщина до 25 мм) или полое (толщина стенки 2 мм) сечение, либо представляют собой плоские образцы толщиной до 10 мм. Образцы такой формы и малых размеров не позволяют исследовать влияние химического состава наплавочных материалов и конструкции наплавленных слоев в многослойных наплавленных образцах на их циклическую долговечность. На стандарт-

ных образцах также невозможно оценить влияние особенностей выполнения ремонтно-восстановительной и изготовительной наплавки на характеристики сопротивления усталостной долговечности деталей. В результате испытания, как правило, проводятся на специализированных экспериментальных установках, на образцах различной конструкции, редко имитирующих работу натуральных деталей в процессе эксплуатации, что приводит к результатам, которые существенно отличаются для одного и того же материала и технологии наплавки [4–8].

Следует отметить, что при наплавке некоторых деталей, например, прокатных валков, штампов, роликов МНЛЗ и т. д., используются наплавочные материалы, обеспечивающие получение наплавленного металла типа инструментальных сталей достаточно высокой твердости ($HRC > 45$) и износостойкости. Высокая твердость наплавленного металла значительно усложняет технологию изготовления соответствующих образцов для усталостных испытаний, обуславливая необходимость проведения полного цикла термической обработки. Вместе с тем в производственных условиях детали после наплавки, как правило, не проходят полную термическую обработку и, таким образом, судить о циклической долговечности наплавленных деталей можно только косвенно.

Цель данной работы — разработка конструкции образцов и методик сравнительных исследо-

ваний сопротивления усталости деталей с многослойной наплавкой, которые будут учитывать влияние химического состава наплавленных слоев, их геометрических размеров и технологии и техники наплавки на циклическую долговечность.

Для усталостных испытаний сварных или наплавленных образцов применяют растяжение, чистый или круговой изгиб [4, 6–9]. Исходя из условий эксплуатации деталей металлургического оборудования и некоторых других деталей, требующих ремонта с использованием наплавки, целесообразно проводить испытания при консольном или трехточечном изгибе образцов [4]. Все детали машин, о которых идет речь в данной статье, условно можно разделить на две группы: простой (прокатные валки, ролики МНЛЗ и т. п.) и сложной (зубчатые колеса, упорная резьба и т. п.) формы.

Группа 1. Для образцов, имитирующих наплавленные детали типа прокатных валков, роликов МНЛЗ и т.п., было предложено использовать нагружение образцов по схеме трехточечного изгиба с приложением отнулевой циклической нагрузки по центру образца (рис. 1). Испытания по данной схеме с определенным допущением воспроизводят силовые нагрузки, характерные для указанных деталей и, кроме того, в процессе испытаний можно проводить визуальную оценку скорости распространения усталостной трещины. При выборе размеров образца необходимо учитывать влияние масштабного фактора на характеристики сопротивления усталости, т. е. ширину образца следует выбирать исходя из условия со-

хранения одноосного напряженного состояния во всех точках образца [1].

Форма и размеры образцов для испытаний на усталость должны задаваться не только на основании указанных выше требований, но также исходя из того, что наплавленный образец должен в достаточной степени имитировать наплавленную многослойную конструкцию реальной детали. Поскольку наплавка на образец производится только с одной стороны, то его размеры должны быть такими, чтобы деформации образца после наплавки были минимальными. Исходя из имеющегося опыта [10, 11] и результатов предварительных экспериментов, разработана конструкция призматических образцов (в форме прямоугольного параллелепипеда) размерами 20×40×300 мм с разделкой под наплавку шириной 150 мм и глубиной 10 мм (рис. 2).

При необходимости изготовления образцов, отличных по геометрическим параметрам от образцов, приведенных на рис. 2, для расчета размеров разделки под наплавку рекомендуется использовать результаты работы [10]. Главное требование — места перехода от наплавленного к основному металлу (указаны стрелками на рис. 1, б) не должны быть потенциальным местом зарождения усталостных трещин вследствие слишком близкого расположения к месту приложения внешней нагрузки.

Для оценки циклической долговечности деталей, наплавленный металл которых имеет высокую твердость ($HRC\ 46\dots 50$), разработана следующая технология изготовления образцов.

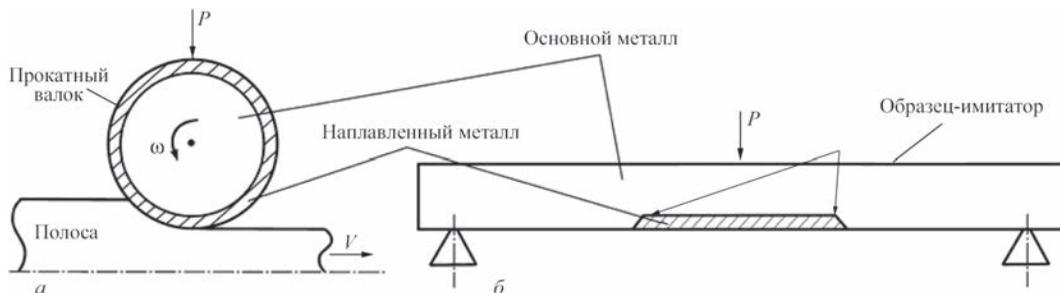


Рис. 1. Схема прокатки полосы (а) и нагружение образца-имитатора по схеме трехточечного изгиба (б). Стрелками указаны места перехода от основного металла к наплавленному

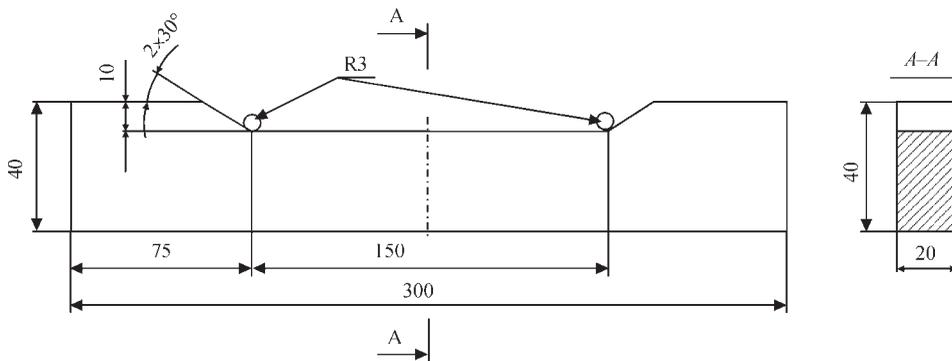


Рис. 2. Заготовка образца для исследования усталостной долговечности с разделкой под наплавку размерами 10×20×150 мм

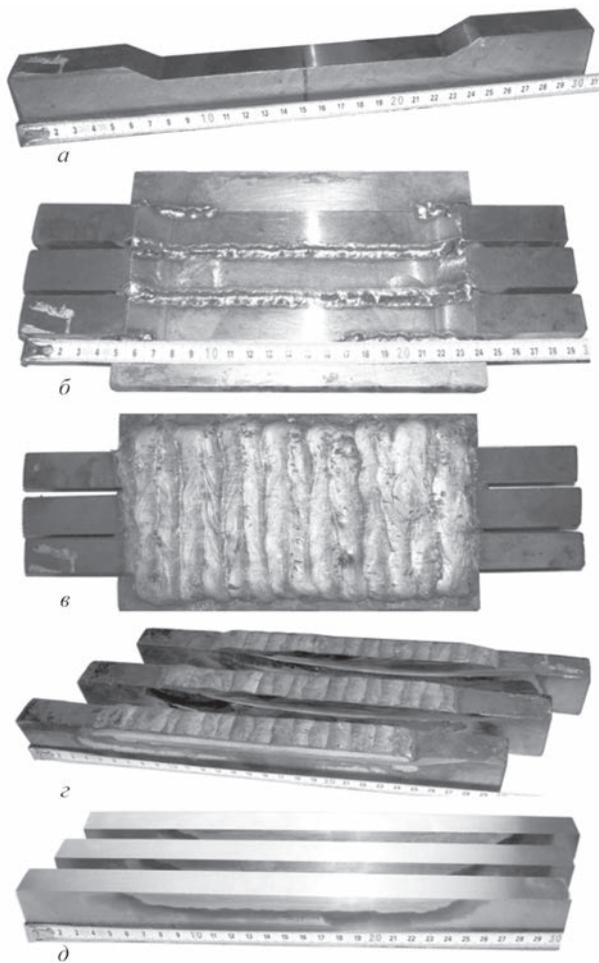


Рис. 3. Этапы изготовления наплавленных образцов: заготовка с разделкой под наплавку (а); заготовки, собранные в пакет (б), после наплавки (в), порезки (г) и финишного шлифования (д)

Заготовки с небольшим припуском на последующую механическую обработку собираются в пакет при помощи технологических вставок толщиной 5 мм. По бокам такого пакета приваривают выводные планки и выполняют автоматическую электродугую многослойную наплавку пакетов (рис. 3). После этого наплавленный пакет заготовок разрезается абразивными кругами по технологическим вставкам на отдельные заготовки и

на шлифовальном станке снимается перегретый в процессе резки слой металла (в процессе механической обработки образцов не допускается их нагрев выше 50 °С). После финишного шлифования всех четырех сторон образцы готовы для испытаний на усталость. Данная технология изготовления образцов обеспечивает сохранение их постоянных поперечных размеров, не допускает искривления по какой-либо из осей, обеспечивает шероховатость поверхности по 9-10 классу чистоты по ГОСТ 2789-73.

Группа 2. Для образцов, имитирующих наплавленные детали сложной формы (зубья крупномодульных шестерен, крупная резьба нажимных винтов прокатных станков, упорная резьба подвесных конусов конусных дробилок, шатунные шейки коленчатых валов и т. п.), разработана конструкция образцов, учитывающая особенности изнашивания и приложения силовых нагрузок у деталей этой группы. У таких деталей зона изнашивания и приложения циклической нагрузки не совпадают с зоной наиболее вероятного появления усталостных повреждений (рис. 4, а, б). Например, силы трения, возникающие в процессе эксплуатации зубчатых колес, приводят к их износу и образованию впадин вдоль их полюсной линии (рис. 4, б). При этом в процессе эксплуатации циклические напряжения достигают максимальных значений в корне зуба, а зона максимального износа располагается выше. Кроме того, переход от корня зуба к впадине является концентратором напряжений [10].

На практике возможны две схемы наплавки зуба: первая — восстановительная (рис. 5, б), целью которой является наплавка только изношенной области; вторая — восстановительно-упрочняющая (рис. 5, в), целью которой является не только восстановление формы зуба, но и замена наплавленным металлом поврежденной части материала в зоне концентрации напряжений у основания зуба.

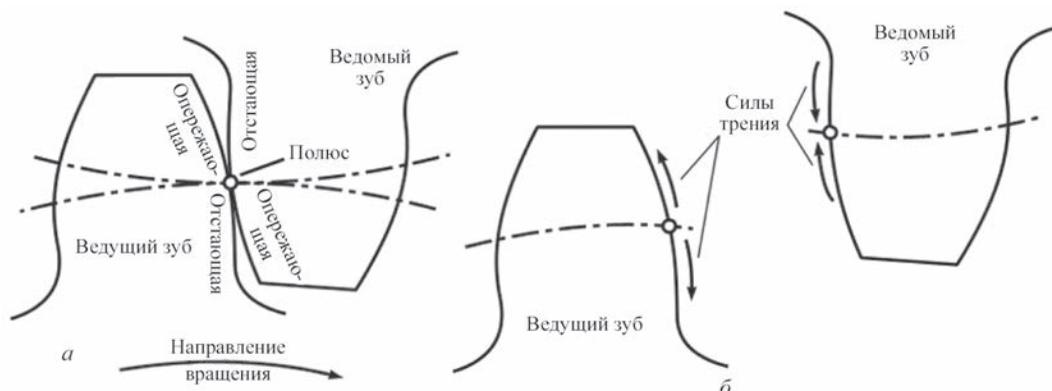


Рис. 4. Расположение отстающих и опережающих поверхностей (а) и направление сил трения (б) на ведущем и ведомом профилях зубьев [10]

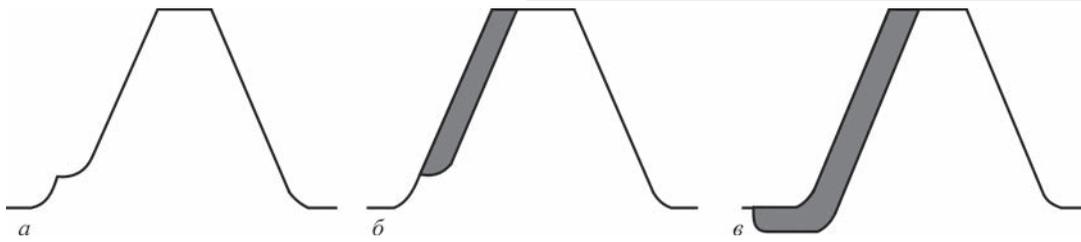


Рис. 5. Форма изношенного зуба (а) и возможные схемы его наплавки: б — восстановление первоначальных размеров зуба (схема 1); в — восстановительно-упрочняющая наплавка с заменой поврежденного материала в зоне концентрации напряжений у корня зуба (схема 2)

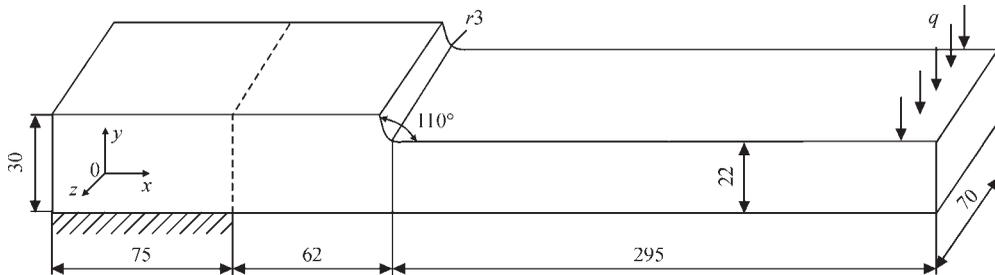


Рис. 6. Схема нагружения модельного образца для исследования циклической долговечности зуба шестерни (q — приложенная внешняя циклическая отнулевая нагрузка)

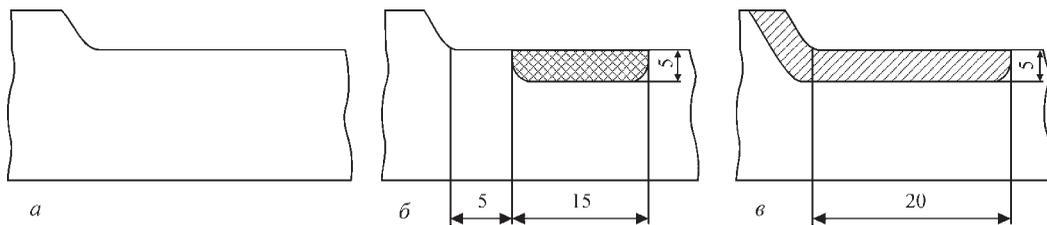


Рис. 7. Схемы выполнения восстановительной наплавки образцов для испытаний на усталость: исходный (а); с разделкой под наплавку по схеме 1 (б) и с разделкой под наплавку по схеме 2 (в)

Характерным для данных схем является существенное различие распределения остаточных напряжений после наплавки, что может оказывать влияние на долговечность наплавленной детали. Так, если наплавлять только изношенную область и восстанавливать только форму зуба, то растягивающие остаточные сварочные напряжения могут значительно понизить усталостную долговечность восстановленной детали. Восстановление геометрических размеров изношенных деталей, без устранения усталостных повреждений вне зоны износа, не дает положительных результатов [10].

Исходя из того, что разрушение зуба шестерни происходит вследствие образования усталостной трещины у его основания, для экспериментальной оценки усталостной долговечности разработана конструкция образцов, имеющих аналогичный концентратор напряжений (рис. 6). Величина радиуса перехода в образцах выбирается исходя из определяющих размеров зубьев реальных крупномодульных шестерен. Испытания на усталость, с учетом приложения реальных нагрузок на деталь, следует проводить при консольном отнулевом изгибе.

В зависимости от применяемой схемы наплавки (см. рис. 5) для усталостных испытаний изго-

тавливали следующие образцы: с концентратором напряжений (рис. 7, а), с разделкой под наплавку по схеме 1 (рис. 7, б) или с разделкой под наплавку по схеме 2 (рис. 7, в).

Разработанные конструкции образцов и методики испытаний были опробованы при исследовании усталостной долговечности материалов, применяемых для наплавки деталей металлургического оборудования, которые изготовлены из средне- и высокоуглеродистых нелегированных или низколегированных конструкционных сталей типа 35ХМ, 40Х, 50Х, 50ХН и т. д. Были изготовлены две партии образцов, соответственно, для исследования циклической долговечности деталей простой (прокатные валки и т.п.) и сложной (зубья и т.п.) формы.

Первая партия образцов (см. рис. 2) состояла из трех серий (по три образца в каждой серии) для испытаний по схеме трехточечного изгиба (см. рис. 1, б). Первую серию образцов из стали 40Х испытывали в исходном состоянии (без наплавки); образцы второй серии — после наплавки порошковой проволокой ПП-Нп-25Х5ФМС диаметром 2,0 мм под флюсом АН-26П (режим наплавки: напряжение 24...26 В; ток 230...250 А; скорость наплавки 20 м/ч); образцы третьей се-

Результаты испытаний усталостной долговечности образцов при циклическом механическом нагружении

Тип и размеры образца	Материал образца	Количество циклов до появления трещины в образцах:			Среднее количество циклов до появления трещины
		1	2	3	
Образцы размерами 20×40×300 мм для испытаний по схеме трехточечного изгиба (рис. 2)					
Сплошной без разделки и наплавки	Сталь 40X	190500	19950	215300	201850
С наплавкой без подслоя	Сталь 40X + 25X5ФМС	120100	134300	124800	126400
С наплавкой с подслоем	Сталь 40X + 08кп + 25X5ФМС	179300	165100	180600	15000
Образцы размерами 30×70×432 мм для испытаний по схеме консольного изгиба (рис. 7, а-в)					
Сплошной без разделки и наплавки	Сталь 35ХМ	185700	176900	178900	180500
С разделкой и наплавкой по схеме 1	Сталь 35ХМ+Нп-30ХГСА	111350	126800	134450	124200
С разделкой и наплавкой по схеме 1*	->-	1200	20100	18800	18700
С разделкой и наплавкой по схеме 2*	->-	214800	220100	234700	223200

* Образцы перед разделкой и наплавкой были нагружены на 10⁵ циклов.

рии — после наплавки на тех же режимах промежуточного слоя сплошной проволокой Св-08 диаметром 2,0 мм под флюсом АН-348А и последующей наплавки порошковой проволокой ПП-Нп-25Х5ФМС под флюсом АН-26П.

Вторая партия образцов (см. рис. 7) состояла из четырех серий (по три образца в каждой серии) для испытаний по схеме консольного изгиба (см. рис. 6). Первую серию образцов из стали 35ХМ испытывали в исходном состоянии (без наплавки); образцы второй серии — после наплавки сплошной проволокой Нп-30ХГСА диаметром 2,2 мм под флюсом АН-26П по схеме 1 (режим наплавки: напряжение 32 В; ток 300 А; скорость наплавки 18 м/ч); образцы третьей серии — после предварительной наработки 10⁵ циклов и последующей разделки и наплавки сплошной проволокой Нп-30ХГСА диаметром 2,2 мм под флюсом АН-26П по схеме 1 (режим наплавки: напряжение 32 В; ток 300 А; скорость наплавки 18 м/ч); образцы четвертой серии — после предварительной наработки 10⁵ циклов и последующей разделки и наплавки сплошной проволокой Нп-30ХГСА диаметром 2,2 мм под флюсом АН-26П по схеме 2 (режим наплавки: напряжение 32 В; ток 300 А; скорость наплавки 18 м/ч).

Расчет предельных нагрузок и количества циклов до разрушения выбирался из следующих предпосылок. Поскольку испытания носили сравнительный характер, то для сокращения време-

ни испытаний за базу было выбрано относительно небольшое количество циклов — 2·10⁵ [11]. Был проведен расчет нагрузок, которые бы обеспечивали такое количество циклов до появления усталостной трещины в образце. Для образцов из сталей 40X и 35ХМ такому количеству циклов соответствуют максимальные прикладываемые напряжения, равные 500 МПа. Результаты испытаний двух партий образцов приведены в таблице.

В процессе испытания каждый образец находится под постоянным визуальным контролем (осмотр каждые 15...30 мин), в ходе которого боковые шлифованные протравленные поверхности образца смазываются керосином для проявления места зарождения трещины. В протоколе испытаний фиксируется количество циклов нагружения образца до момента появления одной или нескольких трещин длиной 1,0...1,5 мм, после чего испытания останавливают. Для примера, на рис. 8 показан внешний вид образца с проявившимися трещинами усталости.

Испытания образцов (таблица), изготовленных из основного металла без и с наплавкой, подтвердили обоснованность принятых расчетных нагрузок и показали, что разработанные методики и образцы могут успешно применяться для сравнительной оценки усталостной долговечности наплавленных деталей. Полученные экспериментальные результаты наглядно иллюстрируют влияние химического состава наплавочных материалов, конструкции наплавленных слоев и схемы наплавки на циклическую долговечность образцов.

Циклическая долговечность образцов первого типа из стали 40X с наплавленным износостойким слоем типа стали 25X5ФМС снизилась примерно на 38 % по сравнению с циклической долговечностью образцов из основного металла без наплавки. Наплавка подслоя из пластичного материала (типа низкоуглеродистой стали 08пс), позволила существенно (примерно на 38 %) повысить цикли-



Рис. 8. Внешний вид боковой поверхности образца с участками, где зародились усталостные трещины: о.м. — основной металл; н.м. — наплавленный металл

ческую долговечность в сравнении с образцами, наплавленными без подслоя. Снижение долговечности по сравнению с ненаплавленными образцами в этом случае не превышает 14 %.

Как следует из данных таблицы, усталостные испытания образцов из стали 35ХМ, имитирующих зубья крупномодульных шестерен, показали, что предварительная циклическая наработка на 10^5 циклов оказывает существенное влияние на долговечность наплавленных образцов, поскольку приводит к накоплению усталостных повреждений в зоне концентратора напряжений у корня зуба. Выполнение восстановительной наплавки по схеме 1 без удаления основного металла, имеющего усталостные повреждения, нецелесообразно, поскольку фактически приводит к значительному снижению остаточной циклической долговечности. Выполнение восстановительно-упрочняющей наплавки по схеме 2, с удалением поврежденного слоя металла у концентратора напряжений, позволяет даже увеличить остаточную усталостную долговечность восстановленных наплавкой зубьев в 1,2 раза по сравнению с исходным состоянием.

Выводы

1. Разработаны конструкции многослойных наплавленных образцов и соответствующие методики для оценки их усталостной долговечности при циклическом механическом нагружении. Эти методики и образцы позволяют проводить сравнительную оценку влияния многослойной наплавки, химического состава наплавленных слоев, их толщины, технологии и техники наплавки на усталостную долговечность наплавленных деталей.

2. При апробации методик установлено, что использование в качестве подслоя пластичного материала типа низкоуглеродистой стали 08пс при износостойкой наплавке образцов из стали 40Х, имитирующих условия эксплуатации прокатных валков, позволило на 38 % повысить их циклическую долговечность в сравнении с образцами, выполненными без подслоя. Аналогичные результаты получены при испытании образцов, имитирующих условия эксплуатации зубьев крупномодульных шестерен. Выполнение наплавки с удалением поврежденного слоя основного металла позволяет увеличить долговечность восстановленных наплавкой зубьев в 1,2 раза в сравнении с исходным состоянием.

Список литературы

1. Школьник Л. М. (1978) *Методика усталостных испытаний*. Москва, Металлургия.
2. Трошенко В. Т. (1978) *Прочность металлов при переменных нагрузках*. Киев, Наукова думка.

3. ГОСТ 25.502–79 (1979) *Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость*.
4. Трошенко В. Т., Сосновский Л. А. (1987) *Сопротивление усталости металлов и сплавов*. Ч. 1. Киев, Наукова думка.
5. Marek A., Junak G., Okrajni J. (2009) Fatigue life of creep resisting steels under conditions of cyclic mechanical and thermal interactions. *Archives of Materials Science and Engineering*, 40, 1, 37–40.
6. Домбровский Ф. С., Лещинский Л. К. (1995) *Работоспособность наплавленных роликов машин непрерывного литья заготовок*. Киев, ИЭС им. Е. О. Патона.
7. Опарин Л. И., Васильев В. Г., Бондарчук Е. П. (1992) Повышение усталостной прочности наплавленного металла типа 15Х13. *Сб. Наплавленный металл. Состав, структура, свойства*, 51–54.
8. Махненко В. И., Шекера В. М., Кравцов Т. Г., Севрюков В. В. (2001) Влияние последующей деформационной обработки на перераспределение остаточных напряжений в наплавленных валах. *Автоматическая сварка*, 7, 3–6.
9. Бизик Н. К., Дарчиашвили Г. И., Трапезон А. Г., Письменный Н. Н. (1986) Влияние наплавки оловянистой бронзы на сопротивление усталости сталей 40ХФМА и 10ХСНД. *Сб. Наплавка при изготовлении деталей машин и оборудования*, 100–103.
10. Рябцев И. А., Сенченков И. К., Турык Э. В. (2015) *Наплавка. Материалы, технологии, математическое моделирование*. Gliwice, Wydawnictwo politechniki slaskiej.
11. Babinets A. A., Ryabtsev I. A. (2016) Fatigue life of multilayer hard-faced specimens. *Welding International*, 30, 4, 305–309. <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1058004>.

References

1. Shkolnik, L.M. (1978) *Procedure of fatigue tests*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
2. Troshchenko, V.T. (1978) *Strength of metals under alternating loads*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
3. GOST 25.502-79 (1979) *Methods of mechanical testing of metals. Methods of fatigue tests* [in Russian].
4. Troshchenko, V.T., Sosnovsky, L.A. (1987) *Fatigue resistance of metals and alloys*. Pt 1. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
5. Marek, A., Junak, G., Okrajni, J. (2009) Fatigue life of creep resisting steels under conditions of cyclic mechanical and thermal interactions. *Archives of Materials Sci. and Engin.*, 40(1), 37-40.
6. Dombrovsky, F.S., Leshchinsky, L.K. (1995) *Serviceability of surfaced rolls of billet continuous casting machines*. Kiev, PWI [in Russian].
7. Oparin, L.I., Vasiliev, V.G., Bondarchuk, E.P. (1992) Improvement of fatigue strength of 15Kh13 type deposited metal. *In: Deposited metal. Composition, structure, properties: Transact.*, 51-54 [in Russian].
8. Makhnenko, V.I., Shekera, V.M., Kravtsov, T.G., Sevryukov, V.V. (2001) Effect of subsequent mechanical treatment on redistribution of residual stresses in surfaced shafts. *The Paton Welding J.*, 7, 2-5.
9. Bizik, N.K., Darchiashvili, G.I., Trapezon, A.G., Pismenny, N.N. (1986) Influence of surfacing of tin bronze on fatigue resistance of 40KhFMA and 10KhSND steels. *In: Surfacing in manufacture of machine and equipment parts: Transact.*, 100-103 [in Russian].
10. Ryabtsev, I.A., Senchenkov, I.K., Turyk, E.V. (2015) *Surfacing. Materials, technologies, mathematical modeling*. Gliwice, Wydawnictwo politechniki slaskiej [in Poland].
11. Babinets A. A., Ryabtsev I. A. (2016) Fatigue life of multilayer hard-faced specimens. *Welding International*, 30, 4, 305–309. <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1058004>.

