

улучшениями во всех трех взаимосвязанных областях.

Библиографический список

1. Воронин Ю.Н. Методы профилактики и ремонта промышленного оборудования / Ю.Н. Воронин, Н.В. Поздняков – М.: Машиностроение, 2005 – 240 с.
2. Карташова В.Н. Экономика организации: Учебник для средних специальных заведений/ В.Н. Карташова, А.В.

Приходько – М.: Приориздат, 2006 – 160 с.

3. Скляренко В.К. Экономика предприятия: Учебное пособие/ Под редакцией В.К. Скляренко, В.М. Прудников – М.: Инфра, 2004 – 256 с.
4. Сергеев И.В. Экономика предприятия: Учебное пособие / И.В. Сергеев – М.: Финансы и статистика, 1999 – 304 с.



УДК 621.81

Л.С. Белевский, И.В. Белевская, О.С. Коптелова
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»
г. Магнитогорск, Россия
E-mail: l.belevskiy@mail.ru
Дата поступления: 12.10.2016

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ СОСТАВНЫХ ИЗДЕЛИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Аннотация

Приведены результаты исследований по повышению несущей способности посадок с натягом, используемых в крупногабаритных составных изделиях металлургического оборудования. Для модификации сопрягаемых поверхностей предложено использовать лазерную обработку с последующим нанесением функционального покрытия гибким инструментом. После обработки лазером на стальной поверхности возникает мартенситная структура с микротвердостью 6500 МПа. Нанесение покрытий позволяет увеличить коэффициент трения и теплопроводность контакта.

Ключевые слова: крупногабаритные составные изделия, валки, лазерная обработка, фрикционное плакирование, гибкий инструмент.

Введение

Крупногабаритные составные изделия (КГСИ) находят достаточно широкое применение в металлургическом и прокатном оборудовании и других областях техники. Это бандажированные прокатные валки, ролики МНЛЗ [1-4], зубчатые колеса приводов и универсальные шпиндели прокатных станов [5, 6], сборные роторы газовых турбин и турбогенераторов, сборные рамные конструкции мощных гидропрессов и металлургических машин [7]. В ряде случаев изготовление КГСИ, их деталей и элементов конструкций в монолитном исполнении вообще невозможно или экономически нецелесообразно. В первую очередь это относится к металлоемким изделиям, таким

как, например, прокатные валки, масса которых на толстолистовых станах достигает 230 т. При износе поверхностного рабочего слоя бочки, толщина которого составляет всего 5-7 % от первоначального диаметра, валки отправляются в скрап. Эти цифры относятся к списанию по естественному износу. Однако немало валков списывается из-за выкрошек, отслоений, сколов и других дефектов. При переплавке валков происходит невозвратная потеря легирующих элементов. Зубчатые колеса после обработки номинального ресурса имеют объемный износ по рабочим поверхностям всего около 0,5 % общей массы.

Одним из методов повторного использования прокатных валков, роликов, центров колес и других цилиндрических изде-

лий, отработавших ресурс по рабочим поверхностям, является бандажирование. При наличии остаточного ресурса по циклам нагружения изделия этот процесс может повторяться несколько раз. Следует отметить, что для большинства составных цилиндрических изделий для крепления бандажа на оси применяется посадка с натягом.

В данной работе кратко рассмотрены основные принципы проектирования КГСИ, собранных по посадке с натягом и приведены результаты исследований по повышению их несущей способности путем модификации сопрягаемых посадочных поверхностей.

Основная часть

Главные достоинства составных прокатных валков, роликов МНЛЗ, зубчатых колес следующие:

– возможность изготавливать бандаж в кованном или литом исполнении из материалов, обладающих высокой износостойкостью, усталостной и контактной прочностью и другими необходимыми функциональными свойствами;

– ось валка или центр колеса могут изготавливаться из достаточно дешевых среднеуглеродистых сталей, способных выдерживать более длительные циклические нагрузки, чем высокоуглеродистые легированные стали;

– посадочная поверхность оси и бандажа перед сборкой может подвергаться дополнительной обработке с целью ее модификации для повышения несущей способности соединения с натягом.

В основу элементарных расчетов бандажированных опорных валков обычно используются формулы Ламе, если для соединения бандажа с осью применяется посадка с натягом. Контактное давление на посадочной поверхности препятствует проворачиванию и сползанию бандажа в осевом направлении. Слишком толстостенные бандажи невозможно изготовить конструктивно из-за ограничения по диаметру шеек и нецелесообразно по экономическим сооб-

ражениям. В тонкостенных бандажах возникают большие напряжения, кроме того, они имеют склонность к раскатыванию. Конструктивно обычно принимают отношение d/D около 0,7 (d – диаметр посадочной поверхности, D – диаметр бочки).

Исследование причин сползания бандажей* показало, что при работе валка возникает специфическое явление взаимного проскальзывания между посадочными поверхностями бандажа и оси, которое объясняется прогибом опорного валка под действием давления металла на валки. При работе валок ведет себя как составной вал при вращении, установленный на двух опорах. При изгибе возникает разность длин волокон посадочных поверхностей оси и бандажа. С каждым оборотом валка происходит периодическое изменение напряжений сдвига от нуля до максимума и наоборот. Величина перемещений края бандажа относительно оси небольшая, порядка десятых долей мм, но из-за большого количества циклов появляются усталостные повреждения от фреттинга, приводящие к ослаблению посадки. В результате по краям бандажа может образоваться кольцевая щель, длина которой постепенно увеличивается по направлению к середине бочки валка. Натяг по длине посадочной поверхности уменьшается, что может привести к сползанию бандажа под действием осевых усилий.

При прогибе валка во время прокатки на посадочной поверхности действуют удельные давления от посадки p , сдвигающие напряжения τ_p и остаточные термические напряжения τ_s . Удельные давления от посадки p создают силы трения τ_f , которые стремятся удержать бандаж от осевого и кругового перемещения относительно оси валка.

Если соблюдается условие $\tau_p < \tau_f$, то скольжение бандажа относительно бочки не произойдет, и валок будет работать без сползания бандажа. В действительности в валках, собранных по посадке с натягом следует учитывать остаточные термические напряжения τ_s , возникающие в результате остывания бандажа. После заведения

* В этом разделе частично использованы материалы отчета К.О. ВНИИМЕТМАШ по бандажированным валкам (рук. К.А. Панин, 1973 г.)

холодной оси в нагретый бандаж происходит медленное охлаждение бандажа совместно с осью. Бандаж при остывании уменьшается в размерах, как по диаметру, так и по длине. Так как длина бочки валка больше диаметра, то абсолютная величина уменьшения размеров бандажа по длине больше, чем по диаметру. Края бандажа остывают быстрее, чем середина. Поэтому бандаж, сначала схватывает ось по краям бочки и продолжает сокращаться вместе с осью. После окончания процесса остывания бандаж находится в растянутом состоянии, ось – в сжатом. С целью снижения термических растягивающих напряжений в бандаже и обеспечения возможности свободного перемещения краев бочки по оси при посадке валка величина натяга по длине посадочной поверхности может выполняться переменной, например, в средней части в центре – $1/1000$, по краям – $0,5/1000$.

На станах горячей и холодной прокатки ОАО «ММК» нашла применение конструкция валка с «обратным конусом» [3, 8, 9] с бандажами из литой заэвтектоидной стали 150ХНМ.

Известны конструкции опорных валков толстолистовых станов с бандажом и осью, состоящей из двух частей [10].

Например, для стана 5000 горячей прокатки итальянской компанией SDF изготовлен составной опорный валок, в котором две конусообразные части оси, сопрягаются с внутренними поверхностями бандажа и стягиваются в осевом направлении винтом (рисунок 1). Опыт эксплуатации валка такой конструкции свидетельствует о его недостаточной надежности. Вскоре после начала эксплуатации произошло самопроизвольное развинчивание резьбового соединения, что привело к внеплановой перевалке, и потребовалась повторная затяжка винта. Валок был вновь завален в клеть и вскоре был списан из-за разрушения бандажа. По этой же причине был списан и второй составной валок этой фирмы.

На стане 5000 усилия, воспринимаемые опорными валками, достигают 10-12 тыс. тонн. При изгибе валка части оси с коническими посадочными поверхностями удерживаются силами трения, возникающими при затяжке и самим винтом. Сопрягаемые конусные поверхности осей бандажа направлены таким образом, что части оси при нагрузке стремятся сместиться относительно друг друга в противоположные стороны, что неизбежно приводит к уменьшению натяга.

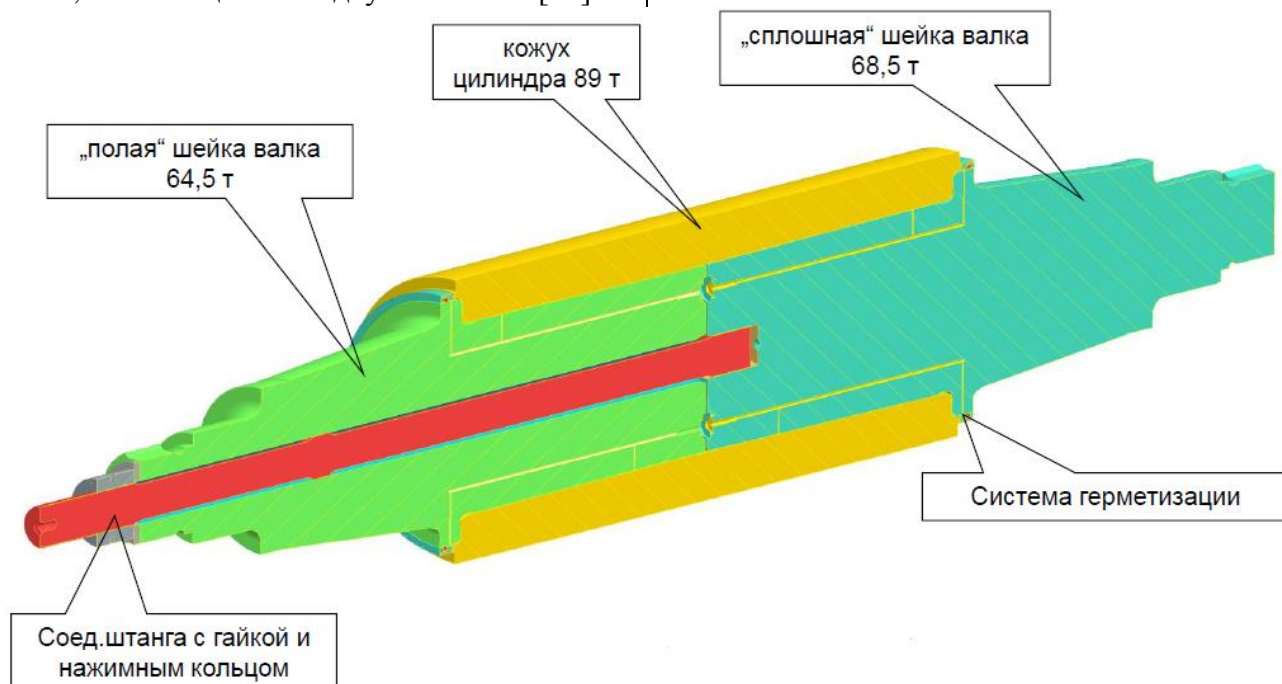


Рисунок 1. Составной опорный валок

Нами разработана конструкция составного валка, в котором в значительной мере удалось избежать перечисленных выше недостатков. На рисунке 2 представлена конструкция модели бандажированного валка с составной осью [11].

Участки оси, сопряженные с бандажом, выполнены эквидистантными в виде двух усеченных конусов, направленных большими основаниями навстречу друг

другу. Направления конусов здесь противоположные, чем у конусов в конструкции валка компании SDF. Перед сборкой бандаж нагревается до температуры 300-400°C и в него заводятся составные части оси. После остывания мы получаем соединение с натягом. Отличительной особенностью этой конструкции является то, что при увеличении усилий изгиба валка величина натяга не уменьшается, а наоборот, увеличивается.

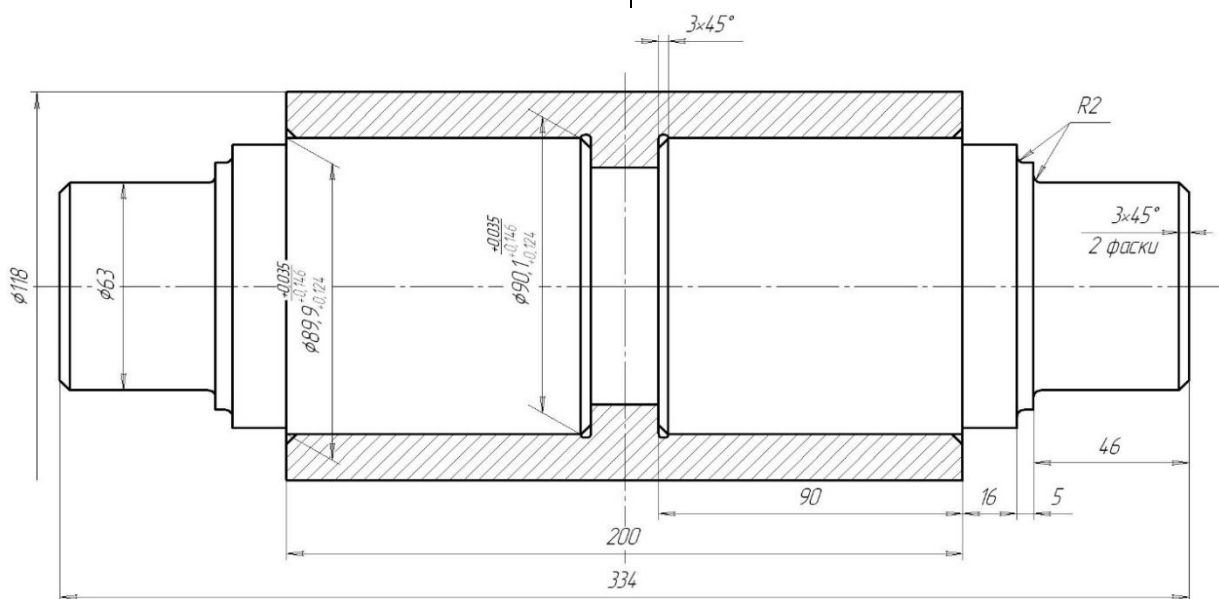


Рисунок 2. Прокатный валок с составной осью

Несущую способность (прочность) в окружном и осевом направлении соединений с натягом ориентировочно можно оценить по формулам:

$$T = \pi d^2 l p f_{кр} / 2, \quad (1)$$

$$F_{ос} = \pi d l p \cdot f_{ос}, \quad (2)$$

где p – давление в соединении,

$f_{ос}, f_{кр}$ – коэффициенты трения при осевом сдвиге от силы $F_{ос}$ и кручении от момента T .

В эти формулы входит коэффициент трения и, следовательно, при прочих равных условиях несущая способность соединения определяется величиной коэффициента трения. Как известно, величина f зависит от многих факторов и колеблется в очень широких пределах. По сути дела выбор величины f определяет коэффициент запаса. Увеличение какими-либо путями коэффициента трения позволяет уменьшить натяг и, как следствие, вероятность разрушения бандажа от растягивающих напряжений.

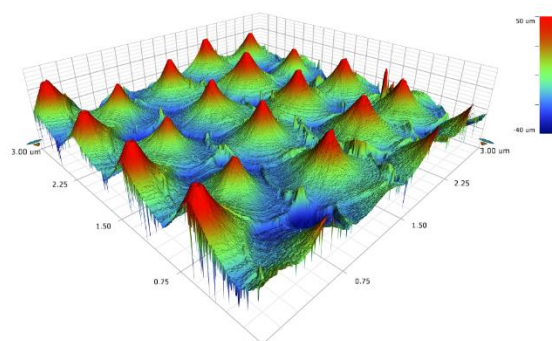
Увеличение сил трения на контакте может быть достигнуто модифицированием посадочных поверхностей, например, упрочнением или нанесением покрытий. Для упрочнения и создания сжимающих напряжений могут использоваться различные способы поверхностного пластического деформирования (ППД). Нанесение различных металлических покрытий на сопрягаемые поверхности может существенно изменить коэффициент трения. Следует заметить, что в работах, где рассматривается влияние покрытий на несущую способность соединений с натягом, покрытия наносились электролитическим или горячим способом на небольшие образцы или модели прокатных валков. Использование таких способов для крупногабаритных валков потребует создания специальных отделений или цехов. При нанесении покрытий возникает целый комплекс вопросов: материал покрытия, метод его нанесения,

возможность реализации на машиностроительном или металлургическом предприятии, влияние покрытия на работоспособность вала в целом и др.

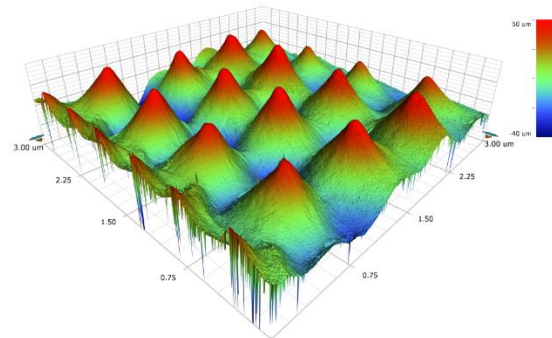
При расчете составных прокатных валков и зубчатых колес обычно принимают $f=0,12...0,14$ [2, 5]. Известно, что при обработке сопрягаемых плоских поверхностей фрикционных болтовых соединений вращающимися проволочными щетками (ВПЩ) $f=0,35$, при пескоструйной или дробеструйной обработке $f=0,58$, примерно такие же величины f достигаются при лазерной очистке [12]. Повышение нагрузочной способности соединений с натягом возможно также электроэрозионным легированием и лазерной закалкой [13].

Для модификации поверхности можно использовать различные технологии, но лазерная обработка является, вероятно, наиболее передовым способом. Лазерная обработка приводит к образованию очень большого количества микроямок на поверхности. Каждое из этих микроуглублений может служить как резервуар для смазочного материала или как микроловушка для частиц износа при сухом трении, что позволяет уменьшить повреждение при фреттинге и повысить усталостную долговечность. Само наличие ямок после лазерной обработки увеличивает коэффициент трения во фрикционных соединениях. Кроме того, эти микроямки можно заполнить каким-либо функциональным покрытием.

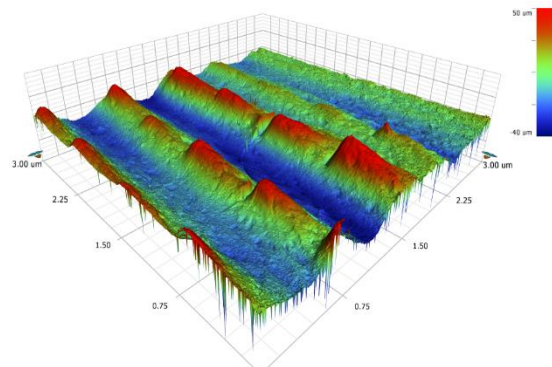
Нами проведены эксперименты по нанесению покрытия на поверхность, обработанную лазером. На рисунке 3 показан вид поверхности ролика* из стали 20 обработанного лазером (нагрев на глубину 50 мкм с оплавлением) (рисунок 3, а) и нанесенным методом фрикционного плакирования ВПЩ латунным покрытием (рисунок 3, б, в). Более толстое покрытие (рисунок 3, в) почти полностью заполняет впадины между выступами, кроме того, вследствие фрикционного действия ВПЩ сглаживаются вершины выступов.



а)



б)



в)

Рисунок 3. Вид поверхности
а) после лазерной обработки;
б) после нанесения латунного покрытия
толщиной 5-7 мкм;
в) после нанесения латунного покрытия
толщиной 20-25 мкм

В таблице представлены характеристики поверхности образца до и после нанесения покрытия, а на рисунке 4 диаграмма соотношения значений параметров микро топографии.

* Исследование микро топографии поверхности проводилось в лаборатории Научно-исследовательского центра «Микро топография» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» на установке Contour GT K1 Губаревым Е.В.

Таблица Характеристики поверхности образца до и после нанесения покрытия

Характеристика	Sa	Sku	Ssk	Sdq	Sdr	Sds	Sal	Vvc
Ед. измерения	мкм			Град	%	1/мм ²	мкм	мкм ³ /мм ²
Без покрытия	6,7	4,52	0,917	21,4	7,2	253	213	11,8
Покрытие 5-7 мкм	10,2	3,42	0,213	20,2	6,3	270	237	16,8
Покрытие 15-20 мкм	5,32	3,33	0,519	18,1	5,1	312	173	9,0

Вследствие заполнения неровностей и пустот латунию поверхность образца становится более «гладкой» и менее «развитой». Это хорошо видно по уменьшению параметров Sa, Vvc, Sdq, Sdr, а также по увеличению Ssk. Об увеличении количества пиков говорит возрастание параметра Sds и одновременное уменьшение Sal. С увеличением толщины покрытия следы лазерной обработки, представляющие собой отдельно стоящие вершины, объединяются в «хребты», т.е.

происходит переход из детерминированного профиля в периодический. Антифрикционное покрытие может быть использовано для повышения износостойкости пар трения. Покрытия из алюминия или меди, обработанной лазером поверхности, могут применяться для увеличения площади фактического контакта, его теплопроводности и несущей способности соединений с натягом [10].

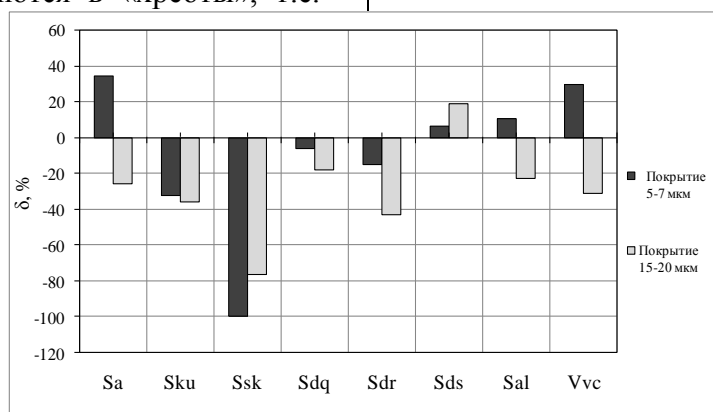


Рисунок 4. Диаграмма процентного соотношения значений параметров микротопографии поверхности образца до и после нанесения покрытия различной толщины

На рисунке 5 представлена поверхность ролика, обработанного лазером, которая покрыта окружностями, возникшими при оплавлении стальной поверхности ролика под воздействием лазера (рисунок 5, а), что подтверждается наличием литой дендритной структуры (рисунок 5, б)*

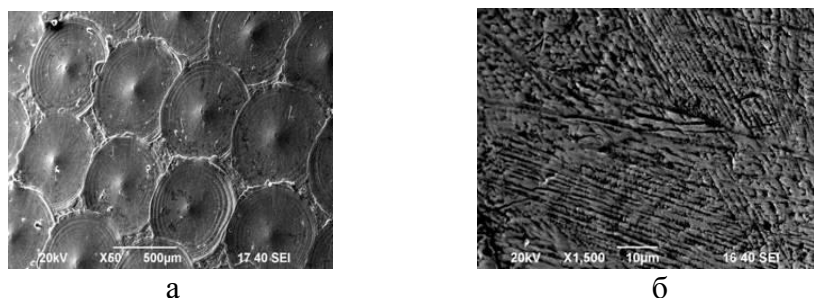


Рисунок 5 – Поверхность ролика, обработанного лазером

* Металлографические исследования выполнены в ЦКП НИИ «Наносталь» ФГБУ к.т.н. Ю.Ю.Ефимовой.

На рисунке 6 представлена микроструктура поверхности ролика после обработки лазером (рисунок 6, а) и нанесенного ВПЦ латунного покрытия толщиной 10-30 мкм (рисунок 6, б). По ней можно определить протяженность зоны термического влияния, возникшую при лазерной обработке, которая составляет около 250 мкм.

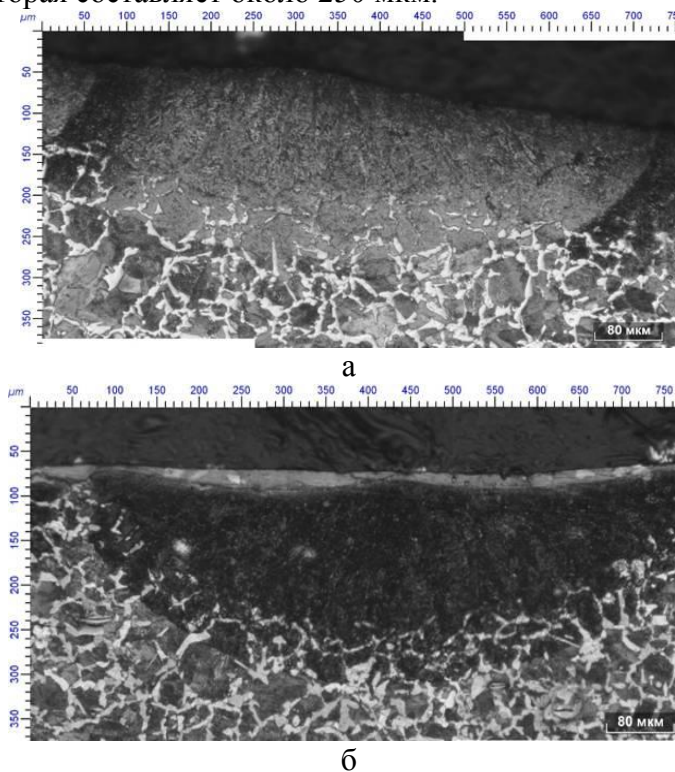


Рисунок 6. Микроструктура поверхности ролика после обработки лазером (а) и нанесенного гибким инструментом покрытия (б)

Зона термического влияния после обработки поверхности стального ролика лазером состоит из мартенситной структуры с микротвердостью порядка 6500 МПа и по мере удаления от поверхности переходит в феррито-перлитную структуру с микротвердостью 2500 МПа.

Заключение

В КГСИ используются, в основном, посадки с натягом. Повышение их несущей способности может быть осуществлено путем модификации сопрягаемых поверхностей. Предложено использовать обработку лазером с последующим нанесением функциональных покрытий методом фрикционного плакирования гибким инструментом. Это позволяет увеличить коэффициент трения, теплопроводность контакта и уменьшить повреждения от фреттинга.

Библиографический список

1. Прочность прокатных валков / П.И. Полухин, В.А. Николаев, В.П. Полухин и др. Алма-Ата: Наука, 1984. 295 с.

2. Белевский Л.С., Фиркович А.Ю., Сударгин И.В. и др. Составные прокатные валки: Монография. Магнитогорск: МГТУ, 2004. 206 с.
3. Белевский Л.С., Кадошников В.И., Белевская Е.Л., Москвин В.М., Исмаилов Р.Р., Фиркович А.Ю., Клочков О.С. Бандажированные прокатные валки и ролики МНЛЗ: монография / Магнитогорск: МГТУ, 2009. 234 с.
4. Технология восстановления крупногабаритных составных прокатных валков / Лебедь В.Т. // Вестник национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт". Машиностроение. К.: НТУУ "КПИ". 2007. № 52. С. 70.
5. Ворovich И.И., Сафронов Ю.В., Устинов Ю.А. Прочность колес сложной конструкции. М.: Машиностроение. 1967. 193 с.
6. Лебедь В.Т. Повышение качества соединения крупногабаритных составных изделий: Изд-во Вестник нац. техн.

- ун-та «ХПИ». Технологии в машиностроении. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2015. С. 181-184.
7. Кудрявцев И.В., Наумченков Н.Е., Саввина Н.М. Усталость крупных деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 240 с.
 8. Фиркович А.Ю., Полухин В.П., Николаев В.А. и др. // Бюл. ин-та «Черметинформация». 1974. № 23 (739). С. 44.
 9. Фиркович А.Ю. Повышение долговечности составных опорных валков // Сталь. 1981. № 10. С. 53-54.
 10. Белевский Л.С., Исмагилов Р.Р., Белевская И.В., Клочков О.С., Фиркович А.Ю. Совершенствование технологии изготовления, методики расчета, кон-

струкций и условий эксплуатации прокатных валков: монография / Магнитогорск: МГТУ, 2015. 225 с.

11. Пат. на полезную модель №100436 РФ, МПК В21В 27/03. Бандажированный прокатный валок / Белевский Л.С., Исмагилов Р.Р., Клочков О.С. и др. (РФ). Опубл.: 20.12.2010. Бюл. № 35.
12. Лазерная очистка в машиностроении и приборостроении/ Вейко В.П., Смирнов В.Н., Чирков А.М. СПб.: НИУ ИТМО. 2013. 103 с.
13. Алехин А.Г. Повышение нагрузочной способности соединений с натягом на основе лазерной закалки: Автореф. дис. к-та техн. наук, Волгоград. 2004. 18 с.



УДК 621.771

Э.И. Фахретдинова, Р.Ф. Галлямова, Г.И. Рааб
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
авиационный технический университет»
г. Уфа, Россия

E-mail: yelka89@mail.ru

Дата поступления: 06.10.2016

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ И ОСОБЕННОСТЕЙ МИКРОСТРУКТУРЫ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА МУЛЬТИ-РКУП-КОНФОРМ

Аннотация

Показаны особенности деформированного состояния алюминиевого сплава системы Al-Mg-Si при практической реализации процесса Мульти-РКУП-Конформ. Данный способ обработки за один цикл обеспечивает уровень суммарной деформации сдвига, превышающий три единицы, что позволяет исключить многоцикловую обработку. Представлен расчет деформации сдвига, исследована трансформация микроструктуры алюминиевого сплава Al6101 и проанализирован характер течения материала. Выявлены участки затрудненного течения (застойные зоны) металла и определены причины их появления. Проведены оценки структурных состояний застойных зон и механического поведения полученных в этих условиях образцов.

Ключевые слова: методы интенсивной пластической деформации, алюминиевые сплавы, метод сеток, деформация сдвига.

Введение

Деформированное состояние металлов во многом отвечает за структурное состояние и уровень механических свойств деформируемых металлов. Поэтому исследование этого фактора в процессах ОМД является важным и значимым для адекватного анализа результатов обработки. Наиболее перспективными методами интенсивной пластической деформации (ИПД) для практического использования

являются РКУП-Конформ и Мульти-РКУП-Конформ, использующие разовые большие немонотонные деформации. В силу того, что этими методами можно получать длинномерные ультрамелкозернистые заготовки в виде прутков, катанки и проволоки с повышенными физико-механическими свойствами, тщательные исследования этих процессов весьма актуальны. Целью данной работы является оценка деформированного состояния методом сеток