

**Председатель  
редакционного совета  
и главный редактор**  
ЛАВРИНЕНКО В.Ю., д.т.н., доц.

**Зам. председателя  
редакционного совета:**  
ДЁМИН В.А., д.т.н., проф.  
КОЛЕСНИКОВ А.Г., д.т.н., проф.

**Зам. главного  
редактора**  
СЕРИКОВА Е.А.

**Редакционный совет:**  
БЛАНТЕР М.С., д.ф.-м.н., проф.  
ГАРИБОВ Г.С., д.т.н., проф.  
ГРОМОВ В.Е., д.ф.-м.н., проф.  
ГУН И.Г., д.т.н., проф.  
ЕВСЮКОВ С.А., д.т.н., проф.  
ЕРШОВ М.Ю., д.т.н., проф.  
КАСАТКИН Н.И., к.т.н., проф.  
КИДАЛОВ Н.А., д.т.н., проф.  
КОРОТЧЕНКО А.Ю., д.т.н., доц.  
КОТЕНКО В.И., д.т.н.  
КОШЕЛЕВ О.С., д.т.н., проф.  
КРУК А.Т., д.т.н., проф.  
КУХАРЬ В.Д., д.т.н., проф.  
ЛАРИН С.Н., д.т.н., доц.  
МОНАСТЫРСКИЙ В.П., д.т.н.  
МОРОЗ Б.С., д.т.н., проф.  
МУРАТОВ В.С., д.т.н., проф.  
НАЗАРЯН Э.А., д.т.н., проф.  
НУРАЛИЕВ Ф.А., к.т.н., доц.  
ОВЧИННИКОВ В.В., д.т.н., проф.  
ПОВАРОВА К.Б., д.т.н., проф.  
ПОЛЕТАЕВ В.А., д.т.н., проф.  
СЕМЁНОВ Б.И., д.т.н., проф.  
ТРЕГУБОВ В.И., д.т.н., проф.  
ШАТУЛЬСКИЙ А.А., д.т.н., проф.  
ШПУНЬКИН Н.Ф., к.т.н., проф.  
ЯМПОЛЬСКИЙ В.М., д.т.н., проф.  
БАСТ Ю., Dr.-Ing. habil., prof.  
ОЛУНД Э., Dr. Ir.  
ТУТМАН Т., Dr. Yur.

**Ответственные  
за подготовку и выпуск  
номера:**  
СЕРИКОВА Е.А.  
ОРЛОВА А.В.

Журнал зарегистрирован  
в Роскомнадзоре.  
Свидетельство о регистрации  
ПИ № ФС 77-63952  
от 09.12.2015

За содержание рекламных  
материалов ответственность  
несет рекламодатель

Журнал распространяется  
по подписке, которую можно  
оформить в любом почтовом  
отделении (индекс по каталогу  
"Пресса России" 39205)  
или непосредственно  
в издательстве.

Тел.: (499) 268-47-19, 269-54-96  
Http: //www.mashin.ru  
E-mail: zpm@mashin.ru



## СОДЕРЖАНИЕ

### Литейное и сварочное производства

- Головкин П.А.** Повышение качества фланцев волноводов из сплава АК12 (АЛ2), получаемых методом жидкой штамповки ..... 291
- Труханов К.Ю., Булычев В.В., Шаталов М.И.** Исследование напряженно-деформированного состояния нахлесточного соединения тонколистовых деталей ..... 295
- Филиппов О.И.** Пути совершенствования сварочных работ при строительстве резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов ..... 301

### Кузнечно-штамповочное производство

- Ларин С.Н., Трегубов В.И., Исаева А.Н.** Математическая модель комбинированного выдавливания прутковой заготовки в цилиндрическую матрицу пуансоном с плоской рабочей поверхностью ..... 309

### Прокатно-волочильное производство

- Максимов Е.А., Шаталов Р.Л., Устиновский Е.П.** Определение настроечного зазора при правке листового проката на роликовой правильной машине ..... 313

### Материаловедение и новые материалы

- Швецов О.В., Кондратьев С.Ю., Шемякин Б.А.** Влияние защитных покрытий на работоспособность алюминиевых сплавов в условиях нефтедобычи ..... 319
- Морозова Е.А., Морозов А.П., Муратов В.С.** Влияние термической и поверхностной пластической обработок углеродистой стали на чувствительность к концентраторам напряжений при циклическом нагружении ..... 328

### Информация

- Цирков П.А., Вялков В.Г., Глазунов С.Н., Варламова Л.Д.** Способ восстановления электродуговой наплавкой изношенных поверхностей изделий, изготовленных из чугуна и стали ..... 333

**Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней по группам научных специальностей: 05.02.09 — Технологии и машины обработки давлением; 05.02.10 — Сварка, родственные процессы и технологии; 05.04.11 — Атомное реакторостроение, машины, агрегаты и технология материалов атомной промышленности; 05.16.01 — Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов; 05.16.04 — Литейное производство; 05.16.05 — Обработка металлов давлением; 05.16.06 — Порошковая металлургия и композиционные материалы; 05.16.08 — Нанотехнологии и наноматериалы и в базу данных Chemical Abstracts**

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Заготовительные производства в машиностроении", допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции.

Chairman of Editorial  
Committee and  
Editor-in-chief  
LAVRINENKO V.Yu.

Chairman Assistants  
DEMIN V.A.  
KOLESNIKOV A.G.

Editorial Assistant  
SERIKOVA E.A.

**Editorial Committee**

BLANTER M.S.  
GARIBOV G.S.  
GROMOV V.E.  
GUN I.G.  
EVSYUKOV S.A.  
ERSHOV M.Yu.  
KASATKIN N.I.  
KIDALOV N.A.  
KOROTCHENKO A.Yu.  
KOTENOK V.I.  
KOSHELEV O.S.  
KRUK A.T.  
KUKHAR' V.D.  
LARIN S.N.  
MONASTYRSKY V.P.  
MOROZ B.S.  
MURATOV V.S.  
NAZARYAN E.A.  
NURALIEV F.A.  
OVCHINNIKOV V.V.  
POVAROVA K.B.  
POLETAEV V.A.  
SEMENOV B.I.  
TREGUBOV V.I.  
SHATUL'SKY A.A.  
SHPUN'KIN N.F.  
YAMPOL'SKY V.M.  
BAST Yu.  
ÖHLUND E.  
TUTMANN T.

This issue prepared with  
assistance of specialists:  
SERIKOVA E.A.  
ORLOVA A.V.

Journal is registered by  
Roskomnadzor.  
The certificate of  
registration ПИ № ФС 77-63952,  
December 9, 2015.

An advertiser is responsible for  
the promotional materials

Journal is spreaded on  
a subscription, which can be  
issued in any post office (index  
on the united catalogue "Pressa  
Rossii" 39205) or immediately in  
the edition of the journal.

Ph.: (499) 268-47-19, 269-54-96  
Http: //www.mashin.ru  
E-mail: zpm@mashin.ru

## CONTENTS

### Foundry and Welding Productions

- Golovkin P.A.** Improvement in quality of waveguide flanges made of AK12 (AL2) alloy obtained by liquid forging method .....291
- Trukhanov K.Yu., Bulychev V.V., Shatalov M.I.** Study of thin-sheet lap welding joint strain-stress state .....295
- Filippov O.I.** Ways to improve welding operations in construction of oil product storage tanks .....301

### Forging and Stamping Production

- Larin S.N., Tregubov V.I., Isaeva A.N.** Mathematical model for combined extrusion of bar stock into cylindrical die by flat working surface punch .....309

### Rolling and Drawing Production

- Maksimov E.A., Shatalov R.L., Ustinovsky E.P.** Determination of adjustment positive allowance at straightening of sheet metal on roller-type straightening machine .....313

### Physical Metallurgy and New Materials

- Shvetsov O.V., Kondrat'ev S.Yu., Shemyakinsky B.A.** Effect of protective coatings on serviceability of aluminium alloys in environment of oil production .....319
- Morozova E.A., Morozov A.P., Muratov V.S.** Effect of heat treatment and surface deformation hardening of carbon steel on stress concentrator sensitivity under repeated loading .....328

### Information

- Tsirkov P.A., Vyalkov V.G., Glazunov S.N., Varlamova L.D.** Method for restoring of products worn surfaces made of cast iron and steel by electric arc surfacing .....333

*Journal is included into the list of the Higher Examination Board for publishing of competitors for the academic degrees theses in groups of scientific specialties: 05.02.09 – technologies and forming machines; 05.02.10 – welding, related processes and technologies; 05.04.11 – nuclear reactor engineering, machines, units and materials technology of nuclear industry; 05.16.01 – physical metallurgy and heat treatment of metals and alloys; 05.16.04 – foundry; 05.16.05 – plastic metal forming; 05.16.06 – powder metallurgy and composite materials; 05.16.08 – nanotechnologies and in Chemical Abstracts database*

*Reprint is possible only with the reference to the journal  
"Blanking productions in mechanical engineering"*



УДК 621.73.043.002

DOI: 10.36652/1684-1107-2020-18-7-291-294

П.А. Головкин (АО "Плутон", г. Москва)

## Повышение качества фланцев волноводов из сплава АК12 (АЛ2), получаемых методом жидкой штамповки

*Проанализирован процесс жидкой штамповки типового фланца антенного волновода. Показано, что снижение температуры перегрева уменьшает число и размер газовых пор и глубину кольцевых спаев в отливке фланца, улучшает ее структуру.*

**Ключевые слова:** расплав; температура; перегрев; заливка; кристаллизация; растворенные газы; отливка; газовые поры; кольцевой спай; структура; дендриты.

*The liquid forging process of typical flange of antenna waveguide is analyzed. It is shown that decrease in the superheat temperature reduces the number and size of gas pores and the depth of ring seals in the casting of the flange, and improves its structure.*

**Keywords:** melt; temperature; overheating; pouring; crystallization; dissolved gases; casting; gas pores; ring seal; structure; dendrites.

**Общие положения и условия эксперимента.** Получаемые методом жидкой штамповки [1] детали типа фланец (рис. 1) из литейного силумина марки АК12 (АЛ2) [2] являются типовыми в конструкции изделий мощных радиолокационных систем, в том числе корабельных.

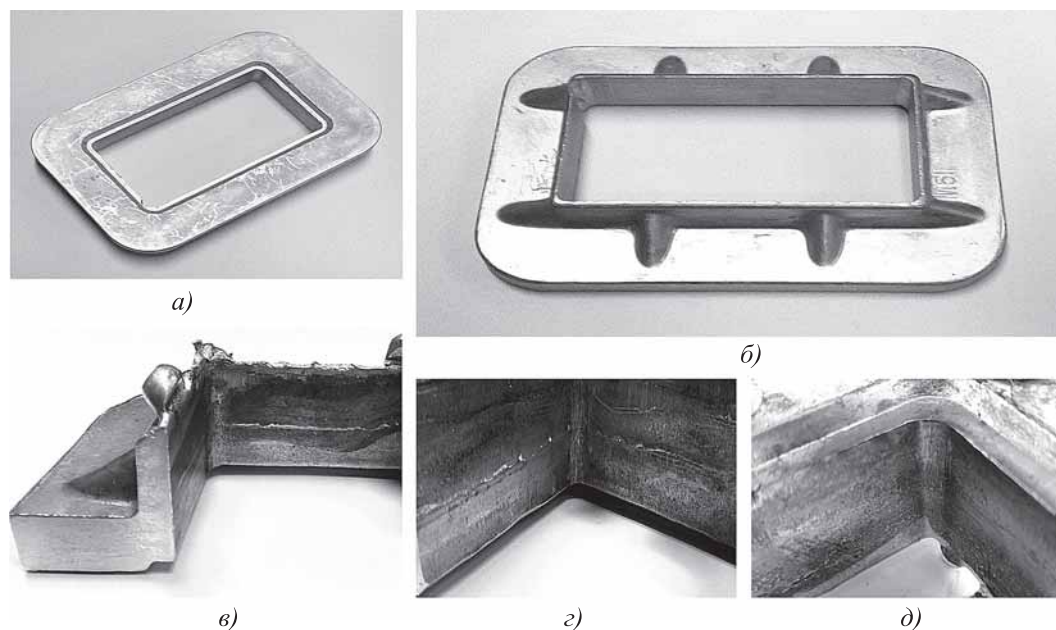
Термин "жидкая штамповка" в ряде случаев не вполне корректен и в действующем ГОСТ 18169—86 соответствует литью с кристаллизацией под давлением [3]. В то же время регламентирующие требования к качеству получаемых отливок ОСТ Р 5.9298—79 [1] и ОСТ 1.80020—83 [4] используют отличающиеся от ГОСТ 18169—86 термины и определения.

Как показывает практика, одной из причин получения некачественных фланцев является излишний перегрев расплава. Анализируя процесс формирования отливки, необходимо связать его параметры с ограничениями растворимости в расплаве газов и, как следствие, с образованием газовой пористости [5]. Другой проблемой при получении отливки фланца

является образование характерных спаев [6] во время пограничного состояния формирующейся деформированной дендритной структуры.

Отливка имеет характерную прямоугольную форму со скругленными углами и выступающим центральным торцом под аргонодуговую сварку с прессованной трубой алюминиевого волновода и восемью характерными силовыми ребрами, по два с каждой стороны фланца (см. рис. 1). В процессе механической обработки литейная корочка удаляется по внутреннему контуру и на являющейся ответной по отношению к аналогичной детали в сборной конструкции волноводного тракта поверхности фланца.

Максимальные габаритные размеры отливки фланца до обработки составляют 175×120×30 мм, центрального прямоугольного отверстия 100×45 мм. Максимальное сечение 32×13 мм, при том что толщина стенок получаемых отливок из алюминиевых сплавов не должна превышать 7 мм [7]. Это значит,



**Рис. 1.** Фланец волновода из сплава АК12 (АЛ2) (а, б), кольцевой спай в его отливке (в, г) и элемент бездефектной отливки (д)

что литье без создаваемого давления должно привести к образованию многочисленных крупных пор в зонах максимальных сечений и к существенному разбросу химического состава материала отливки [5, 7].

Приготовление расплава проводили в открытой стационарной электрической печи сопротивления с чугуном тиглем рабочим объемом 0,1 м<sup>3</sup>, флюсы при плавке не применяли. В качестве средства уменьшения газосодержания в расплаве использовали метод вымораживания, перед которым осуществляли рафинирование хлористыми солями магния и цинка с помощью колокольчика. Однако, возможно, ввиду отсутствия активного перемешивания расплава эффективность этих мер оказалась недостаточной для получения беспористого материала поковок.

Формирование отливки происходит при воздействии на расплав инструмента гидравлического пресса силой 4 МН по пуансонно-поршневой схеме [5]. С учетом площади проекции отливки давление на расплав составляло ≈200 МПа, что соответствует рекомендуемой для такой схемы литья величине [5, 7]. После заливки расплава в матрицу выполняются внедрение в затвердевающий металл пуансона и оформление верхнего фланца и силовых ребер отливки. Ход поршня обеспечивает наибольшее перемещение затвердевающего

материала в зоне тонкостенного внутреннего фланца, подлежащего сварке с прессованной трубой алюминиевого волновода. При этом перемещение затвердевающего расплава провоцирует опасность возникновения спая в корневой зоне внутреннего фланца.

Поршень имеет съемник, удаляющий с него отливку в процессе обратного хода пресса после ее изъятия из матрицы с помощью 10 цилиндрических пальцевых выталкивателей диаметром 15 мм, при этом в роли пуансона выступает возвышающаяся центральная часть матрицы. Заливку расплава с нагрева до 800 °С проводят из мерного ковша вручную, плавка осуществляется в открытой электрической печи сопротивления. Выдавливаемые в зазоре поршня и пуансона в виде капель излишки жидкого металла (см. рис. 1) составляли около 1...2 % массы отливки.

Перед использованием матрицу и пуансон защищают от окисления и пригара расплава с использованием натриевого жидкого стекла по ГОСТ 13078—81 [8] и подогревают до 350...400 °С. Температуру рабочего инструмента пресса в процессе работы и подготовки к ней контролировали с использованием переносного лазерного пирометра.

Сплав АК12 (АЛ2) отличается высокими литейными свойствами ввиду своего эвтектического состава и близких температур солидуса

и ликвидуса, равных 577 и 600 °С соответственно, и малой линейной усадки, составляющей 0,9 % [9], однако в затвердевающих в последнюю очередь областях сплав АК12 (АЛ2) склонен к образованию газовой пористости [5, 7]. Жидкотекучесть при разливке по стандартной методике составляла 400...420 мм, что соответствует требованиям к сплаву [2]. Температуру расплава контролировали с помощью погружной термопары и самописца. Отсутствие возможности корректного контроля температуры пуансона и матрицы в процессе отливки множества фланцев делает актуальным анализ состояния расплава на основе сопоставления литературных и опытных данных.

#### Результаты эксперимента и их анализ.

Скорость перемещения пуансона-поршня отвечала рекомендуемым для жидкой штамповки алюминиевых сплавов 0,06...0,2 м/с [7, 10]. Под давлением жидкая фаза вытесняется из междендритных пространств [11], и в виде ликвиционных скоплений химических элементов или соединений, возникших в результате избирательной кристаллизации при затвердевании отливки [7], способствует образованию спаев, и спаи здесь имеют максимальную глубину, а материал отливки — максимальную дефектность, что показано на рис. 1 и 2. При этом материал в других частях сечения отливки, особенно в местах тонких сечений и у поверхности, отличается хорошей плотностью (см. рис. 2). В результате литейная усадка на уровне 0,4...0,5 высоты отливки — максимальная.

Для уменьшения пористости и ограничения развития спаев было приложено давление через 4...6 с [7, 10] после заливки расплава в матрицу, с появлением первых признаков

усадки тем позже, чем сильнее разогревался инструмент. Время выдержки металлического материала под давлением составляло около 60 с. Меньшая продолжительность выдержки вызывала деформацию отливки в процессе извлечения, а большая — приводила к сильному обжатию пуансона, что затрудняло снятие с него отливки.

Для ограничения развития пористости в отливке фланца критерий снижения растворимости в расплаве газов [11] имеет решающее значение. Известно, что в чистом алюминии растворимость  $H_2$  на 100 г металла при температуре 800 °С составляет 1,85 см<sup>3</sup>, при 700 °С этот показатель снижается до 1,22 см<sup>3</sup>, в застывшем металле ограничивается 0,89 см<sup>3</sup> [12]. По данным [7] абсолютные значения растворимости водорода в алюминии несколько отличаются, однако зависимость та же: с понижением температуры расплава с 900 до 700 °С предельная растворимость  $H_2$  падает примерно в 3 раза. Это значит, что уменьшение перегрева снизит порообразование в материале отливки.

Опыты показали, что температура расплава при заливке в форму с учетом охлаждения при переносе из раздаточной печи не должна быть больше 670...720 °С. Превышение этой температуры вызывает сильное газовыделение и порообразование при затвердевании расплава. При использовании базовой технологии с температурой расплава в раздаточной печи 800 °С в отливках фланцев имеют место области газовой пористости в области спаев с размерами порядка 1 мм в диаметре, что соответствует баллам 4—5 [2]. В то же время понижение температуры расплава ниже 650 °С, с учетом ограниченной

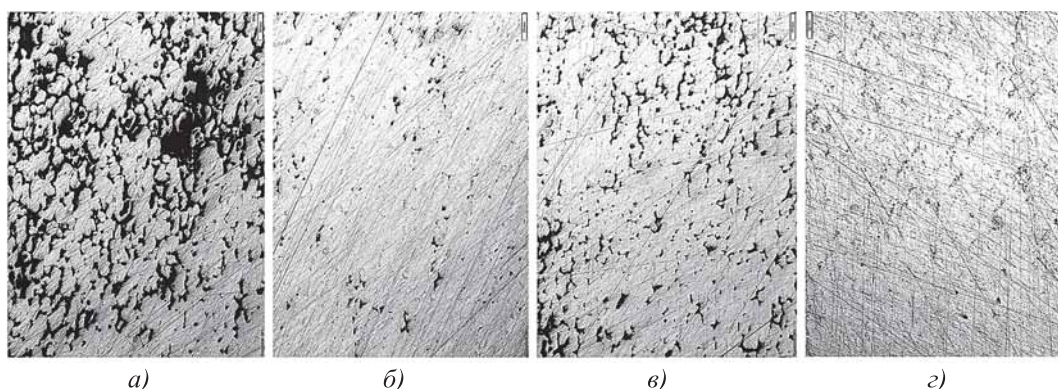


Рис. 2. Типичные структуры в зоне спаев (а, в) и основного сечения (б, з) материала фланцев, полученных по базовому (а, б) и предложенному (в, з) режимам.  $\times 50$

силы пресса, не позволяет в нужной степени залечивать развивающиеся кольцевые спаи. Эти значения хорошо коррелируют с данными работ ( $\approx 700$  °С [5, 10]).

Таким образом, снижение температуры расплава с 830...850 до 750...720 °С уменьшает газовыделение в кристаллизующемся материале отливки. Это подтверждают и типичные структуры материала фланцев, полученных по базовому и предлагаемому режимам (см. рис. 2).

Поскольку растворимость газов в металлическом материале с увеличением давления возрастает, количество выделяющегося газа тем меньше, чем ниже температура расплава и выше давление [11, 12], а это значит, что порообразование накладывает прямое ограничение на допустимый перегрев расплава.

Предлагаемые меры позволили уменьшить пористость вблизи внутреннего контура отливки с балла 5—4 до 1 [2] и фактически исключить формирование спаев, обеспечив получение бездефектной поверхности и сечения отливки (см. рис. 1, 2).

### Выводы

1. Учет предельной растворимости газов в расплаве позволяет получать качественные отливки из сплава АК12 (АЛ2) методом жидкой штамповки. Снижение температуры расплава с 830...850 до 750...720 °С эффективно снижает количество и размер газовых пор в отливке фланца, уменьшая балл пористости в предназначенной для сварки зоне с 5—4 до 1 по ГОСТ 1583—93.

2. Удержание температуры расплава в раздаточной печи в интервале 750...720 °С и температуры заливки в матрицу в пределах 720...670 °С существенно уменьшает обратную ликвацию и размеры характерного для базовой технологии дефекта типа кольцевого спаи,

обеспечивая его полное удаление из объема отливки фланца в процессе механической обработки контура отверстия.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **ОСТ Р 5.9298—79.** Заготовки штампованные из жидких сплавов. Технические условия. М.: МСП СССР, 1980. 32 с.
2. **ГОСТ 1583—93.** Сплавы алюминиевые литейные. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 2000. 50 с.
3. **ГОСТ 18169—86.** Процессы технологические литейного производства. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1986. 15 с.
4. **ОСТ 1.80020—83.** Отливки из алюминиевых сплавов, литье под давлением. Технологические условия. М.: МАП, 1975. 11 с.
5. **Батышев А.И.** Кристаллизация металлов и сплавов под давлением. М.: Металлургия, 1977. 152 с.
6. **ГОСТ 19200—80.** Отливки из чугуна и стали. Термины и определения дефектов. М.: Изд-во стандартов, 1980. 20 с.
7. **Альтман М.Б., Лебедев А.А., Чухров М.В.** Плавка и литье легких сплавов. 2-е изд. М.: Металлургия, 1969. 680 с.
8. **ГОСТ 13078—81.** Стекло натриевое жидкое. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2005. 15 с.
9. **Авиационные материалы:** справочник. Т. 4. Алюминиевые и бериллиевые сплавы. Ч. 2. Литейные алюминиевые сплавы и сплавы на основе бериллия. М.: ВИАМ, ОНТИ, 1986. 132 с.
10. **Полухин П.И., Тюрин В.А., Давидков П.И. и др.** Обработка металлов давлением в машиностроении. М.: Машиностроение; София: Техника, 1983. 279 с.
11. **Плавка и литье цветных металлов и сплавов / под ред. А.Дж. Мерфи / пер. с англ. Т.И. Орловой, М.В. Пикунуова.** М.: Metallurgizdat, 1959. 647 с.
12. **Гладков А.С., Амосов В.М., Копецкий Ч.В. и др.** Металлы и сплавы для электровакуумных приборов / под ред. А.И. Шокина. М.: Энергия, 1969. 600 с.

*Павел Александрович Головкин, канд. техн. наук,  
p.golovkin@pluton.msk.ru*

К.Ю. Труханов, В.В. Булычев, М.И. Шаталов  
(Калужский филиал МГТУ имени Н.Э. Баумана)

## Исследование напряженно-деформированного состояния нахлесточного соединения тонколистовых деталей

Приведены результаты исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) нахлесточного соединения стальных тонколистовых деталей. Проведен анализ требований к параметрам сборки соединения и сварного шва. Исследовано влияние параметров соединения и его формы на НДС для деталей толщиной 2,0 мм с помощью программного пакета ANSYS.

**Ключевые слова:** нахлесточное сварное соединение; компьютерное моделирование; напряженно-деформированное состояние.

The results of steel sheet lap joint strain-stress state are presented. Welding joint parameters requirements are analyzed. The effect of 2 mm welded joint parameters and shape on the strain-stress state using ANSYS software package is studied.

**Keywords:** lap welding joint; computer simulation; strain-stress state.

Автоматизация и роботизация сварочных работ направлена на увеличение производительности, повышение качества и снижение себестоимости выпускаемых изделий. Широкое применение автоматические технологии сварки нашли в автомобильной промышленности [1]. Отличительными особенностями этой отрасли производства являются применение сварных соединений стальных деталей малых и средних толщин, большая программа выпуска изделий. Большинство деталей кузова и несущей системы легкового автомобиля изготовлены из пластин и листов толщиной, как правило, до 3 мм. Большой объем в сварных элементах и узлах имеют нахлесточные соединения.

Требования к сварным соединениям в настоящее время приведены в нескольких руководящих документах. На рис. 1 представлены кон-

тролируемые согласно стандарту VW 01106-1 [2] геометрические показатели нахлесточного соединения. Согласно [2] торцевая поверхность верхнего листа должна быть полностью оплавлена ( $f_{st} = 100\%$ ). Нижняя деталь проплавляется на величину  $f_2 \geq 0,2$  мм и ширину не меньше ее толщины  $b_2 \geq t_2$ . Общая толщина шва должна быть  $s_N \geq 0,7t_{\min}$ .

Допустимые зазоры для уровней качества D, C, B сварных соединений согласно DIN EN ISO 5817 [3] приведены в табл. 1.

Рассматриваемая номенклатура изделий относится к группе оценки B "высокая" [3]. Детали этой группы рассчитаны на большой срок эксплуатации в условиях действия динамических нагрузок.

В табл. 2 представлены требования к параметрам сборки соединения согласно VW 01106-1 [2] и ГОСТ 14771-76 [4] для толщин деталей

### 1. Допустимые размеры зазора $h$ , мм

$t_{\min}$ , мм	Уровни качества сварных соединений		
	D	C	B
$t \leq 1,0$	$\leq 0,8$	$\leq 0,5$	$\leq 0,5$
$1,0 < t \leq 1,4$	$\leq 0,5t_{\min} + 0,3$	$\leq 0,5t_{\min}$	$\leq 0,5t_{\min} - 0,2$
$1,4 < t \leq 2,0$			
$2,0 < t \leq 5,4$	$\leq 3,0$	$\leq 2,7$	$\leq 2,5$
$5,4 < t \leq 6,0$			

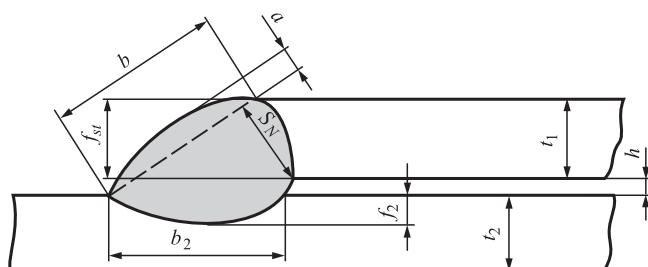


Рис. 1. Параметры нахлесточного соединения

2. Конструктивные параметры соединения (сборки)

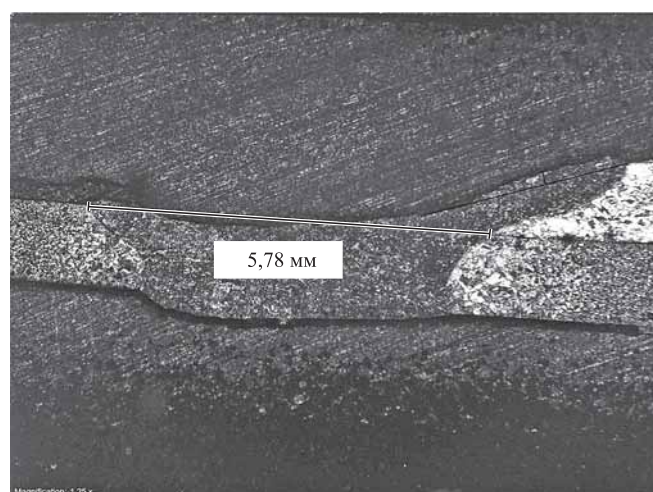
$t_{\min}$ , мм	VW 01106-1				ГОСТ 14771–76		
	$f_{st}$ , %	$b_2$ , мм ( $\geq t_{\min}$ )	$s_N$ , мм ( $\geq 0,7t_{\min}$ )	Зазор $h^*$ , мм	$f_{st}$ , %	Катет $K$ , мм	Зазор $b$ , мм
		min		max			max
0,50	100	0,50	0,35	0,50	100	$3,0^{+1,0}_{-0,5}$	0,5
0,75		0,75	0,53				
1,00		1,00	0,70				
1,25		1,25	0,88				
1,50		1,50	1,05				
1,75		1,75	1,23				
2,00		2,00	1,40	1,0			
2,25		2,25	1,58				
2,50		2,50	1,75				
2,75		2,75	1,93				
3,00		3,00	2,10				

\* Группа В по DIN EN ISO 5817.

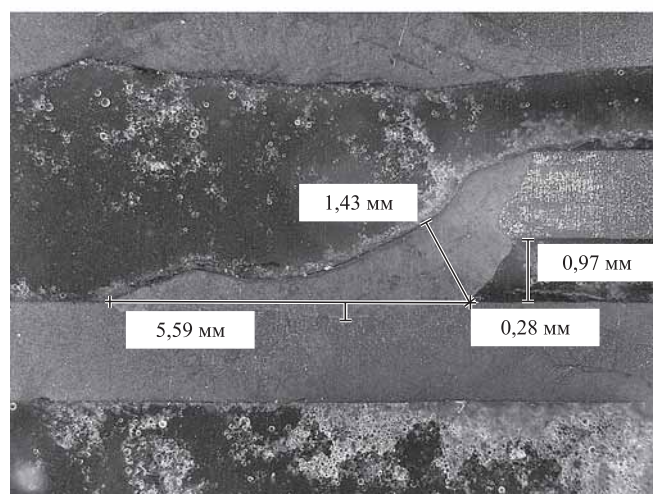
от 0,5 до 3,0 мм с шагом 0,25 мм. Требования к проплавлению верхней детали по рассматриваемым документам совпадают, требования к зазору и катету шва согласно ГОСТ строже. Выпуклость шва  $a$  согласно DIN EN ISO 5817 ограничивается в зависимости от ширины шва  $a \leq 1 + 0,1b$  (см. рис. 1).

На практике определение рассмотренных конструктивных параметров шва с помощью схем, приведенных в нормативной документации, может вызвать определенные трудности. Швы зачастую имеют отличную от приведенных примеров геометрию. Это может быть вызвано отклонениями формы и размеров деталей, погрешностями при их сборке, отклонениями параметров режима сварки. При этом отклонения формы и размеров деталей, не выходящие за рамки технических требований, предъявляемых к ним, могут приводить к искажению формы швов и к невозможности выполнения соединения. Примеры таких швов показаны на рис. 2. Особенно это проявляется при сварке тонких деталей (до 2...3 мм) и требует проведения дополнительных технических мероприятий и приемов, повышенного внимания при выборе параметров режима сварки, положения сварочной горелки относительно соединения и т.д.

Изложенное выше объясняет целесообразность более детального исследования влияния параметров сборки соединения и формы шва на особенности реализации процесса сварки и получаемое качество сварных соединений



а)



б)

Рис. 2. Макрошлифы соединений



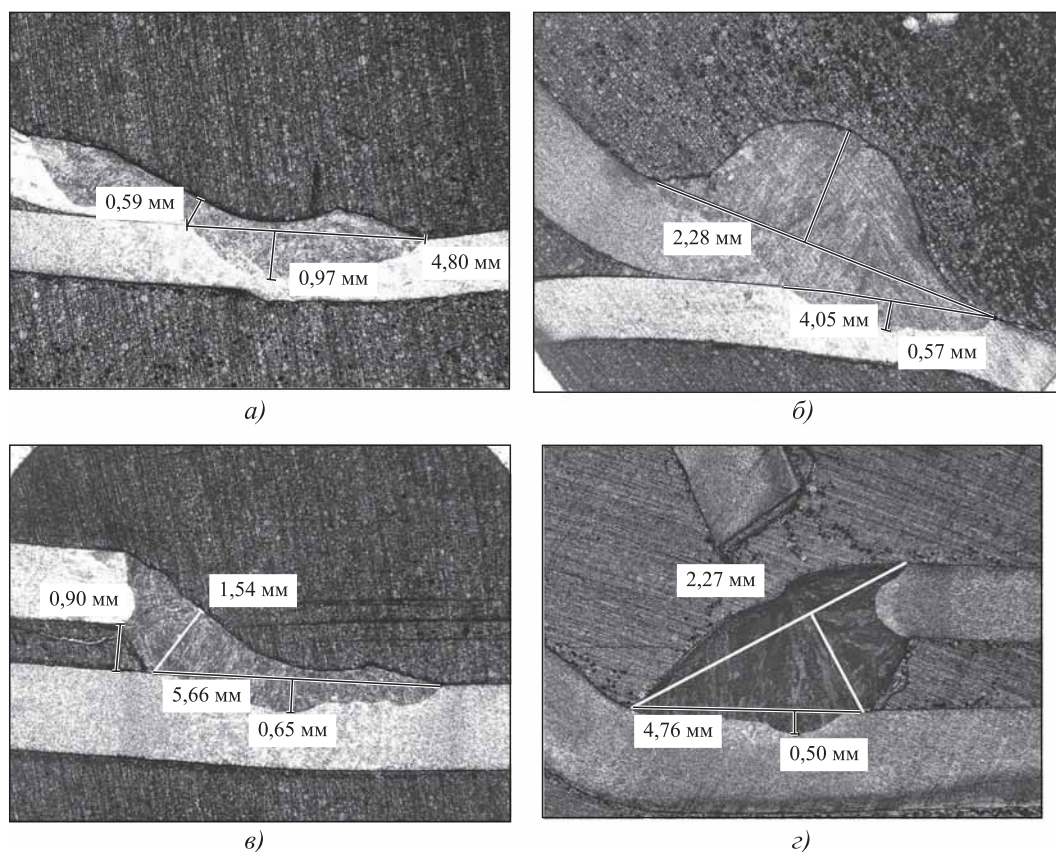


Рис. 3. Примеры отклонения геометрии соединения от требований нормативной документации

для сокращения производственных затрат на подготовительные операции и отбракованные изделия. Представленная статья посвящена исследованию влияния величины зазора  $h$ , торцевого проплавления  $f_{st}$ , ширины сплавления  $b_2$  с деталью и выпуклости шва  $a$  на особенности напряженно-деформированного состояния (НДС) нахлесточных соединений с учетом геометрии сварных швов.

Исследование НДС выполняли посредством математического моделирования в конечно-элементном пакете ANSYS. Геометрию сварного соединения в расчетной модели схематизировали с учетом требований нормативной документации (НД) и экспериментальных данных о форме сварного шва. На рис. 3 приведены примеры

макрошлифов швов с недостаточной общей толщиной  $s_N$  (см. рис. 3, а), с превышением выпуклости  $a$  (см. рис. 3, б), с превышением максимально допустимого зазора (см. рис. 3, в, г).

Математическое моделирование НДС проводили для зазоров  $h = 0,1; 0,5; 1,0; 1,5$  и  $2,0$  мм. Толщина свариваемых листов  $t_1 = t_2 = 2$  мм. Нагружение образца выполняли по схеме [5], представленной на рис. 4. Силу  $F$  подбирали для достижения максимальных напряжений, близких к пределу текучести. В зависимости от зазора варьировали высоту шва, торцевое проплавление верхнего листа  $f_{st}$ . Принятые для расчета механические свойства материала модели и основные геометрические параметры соединения приведены в табл. 3.

### 3. Параметры моделирования

Свойства материала				Геометрические параметры				Нагрузка $F$ , Н
$\sigma_T$	$\sigma_B$	$E$ , ГПа	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$t_1$	$t_2$	$S_{шва}$ , мм <sup>2</sup>	$L$ , мм	
МПа				мм				
245	410	213	7850	2,0	2,0	10,0	50,0	1000

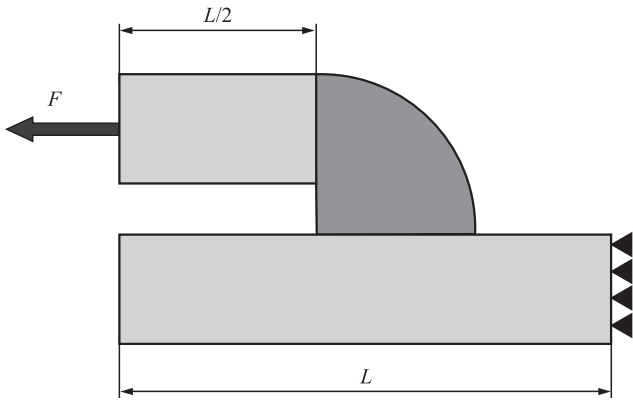


Рис. 4. Схема нагружения

Для исследования влияния на НДС несплавления верхней детали использовали схему, показанную на рис. 5, а (см. обложку). На рис. 5, б приведен пример распределения полей эквивалентных напряжений для  $h = 0,5$  мм и  $f_{st} = 50\%$  (1,0 мм).

Для оценки уровня напряжений в соединении под действием нагрузки были выбраны поверхность лицевой (зона 2) и корневой (зона 1) частей шва (см. рис. 5, а). Максимальные эквивалентные напряжения в этих зонах представлены в табл. 4. На рис. 6 приведены полученные результаты в виде зависимости эквивалентных напряжений  $\sigma_3$  от зазора  $h$  и их линейные аппроксимации.

Наибольшее влияние зазор оказывает при сплавлении  $f_{st} = 50\%$ , напряжения увеличиваются в 2,5–2,6 раза. Для случая полного проплавления верхней детали напряжения повышаются в 1,6–1,9 раза.

Для зазора  $h = 0,5$  мм, находящегося в допустимом диапазоне, уменьшение проплавления верхней детали  $f_{st}$  со 100 до 50% приводит к увеличению напряжений в 1,5 раза (рис. 7).

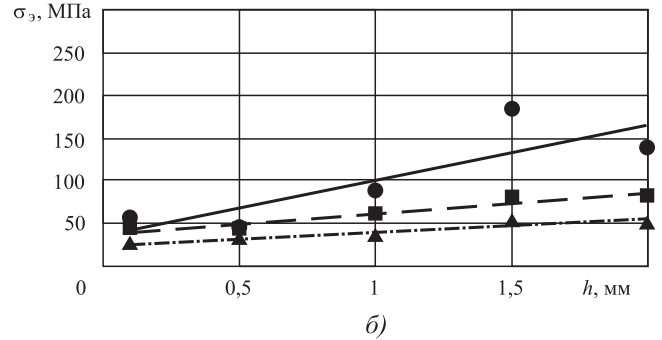
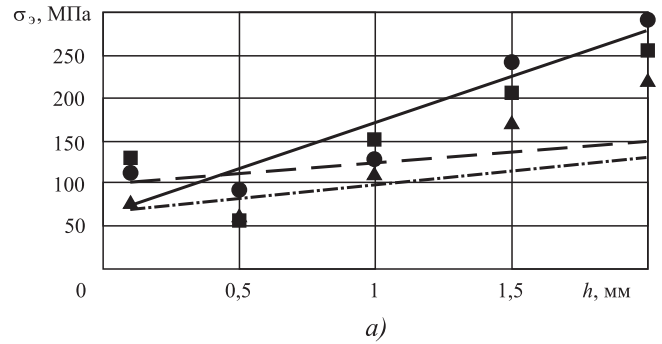


Рис. 6. Максимальные эквивалентные напряжения зон 1 (а) и 2 (б) для различных значений проплавления верхней детали:

●, — —  $f_{st} = 50\%$ ; ■, — — —  $f_{st} = 75\%$ ; ▲, - - - -  $f_{st} = 100\%$

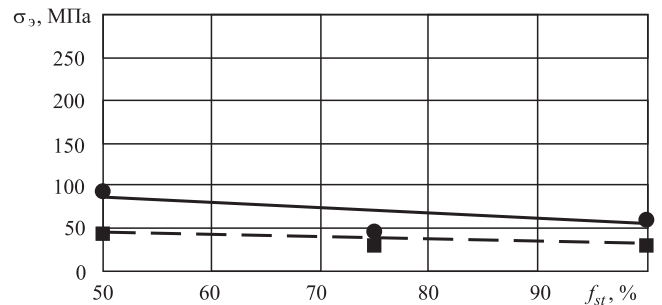


Рис. 7. Максимальные эквивалентные напряжения зон 1 (●, —) и 2 (■, —) для зазора  $h = 0,5$  мм

4. Максимальные эквивалентные напряжения  $\sigma_3$ , МПа, при различных значениях проплавления верхней детали

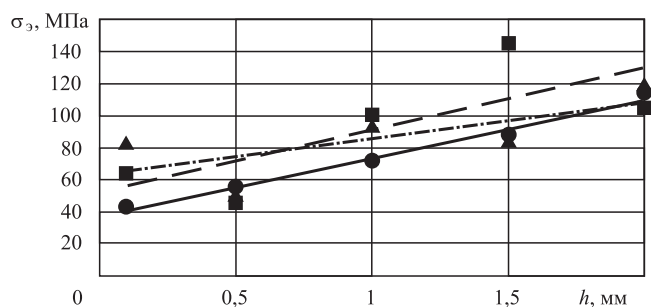
Проплавление верхней детали $f_{st}$ , %	Зона шва	Зазор $h$ , мм				
		0,1	0,5	1,0	1,5	2,0
50	1	114	93	130	243	294
	2	57	44	90	187	141
75	1	129	58	152	169	128
	2	46	43	61	80	83
100	1	77	62	112	123	125
	2	27	32	37	55	52

5. Максимальные эквивалентные напряжения  $\sigma_3$ , МПа, при различных значениях выпуклости шва

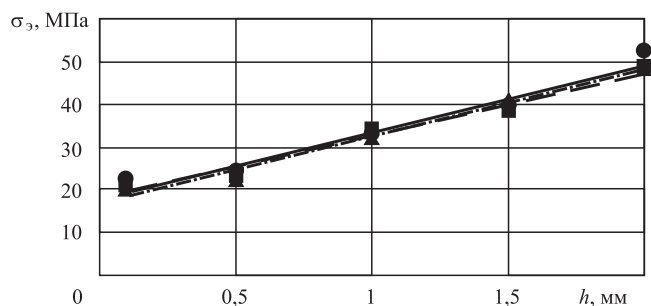
Ширина проплавления $b_2$ , мм	Выпуклость и зона шва	Зазор $h$ , мм				
		0,1	0,5	1,0	1,5	2,0
3,0	$a$ , мм	2,40	1,95	1,70	1,45	1,15
	1	43	55	72	86	113
	2	23	23	33	38	52
3,5	$a$ , мм	1,99	1,76	1,46	1,13	0,83
	1	63	47	99	145	106
	2	21	23	34	38	49
4,0	$a$ , мм	1,74	1,48	1,17	0,85	0,53
	1	82	51	94	85	117
	2	22	22	32	41	49

Для исследования влияния на НДС выпуклости шва использовали схему, показанную на рис. 8, *а* (см. обложку). На рис. 8, *б* представлен пример распределения полей эквивалентных напряжений для  $h = 0,5$  мм и  $b_2 = 3,0$  мм.

Результаты моделирования приведены в табл. 5 и на рис. 9 и 10. Наибольшее влияние зазор оказывает при ширине проплавления 3,0 мм,



*а)*



*б)*

Рис. 9. Максимальные эквивалентные напряжения зон 1 (*а*) и 2 (*б*) для различных значений ширины проплавления: ●, — — —  $b_2 = 3,0$  мм; ■, — — —  $b_2 = 3,5$  мм; ▲, - - - -  $b_2 = 4,5$  мм

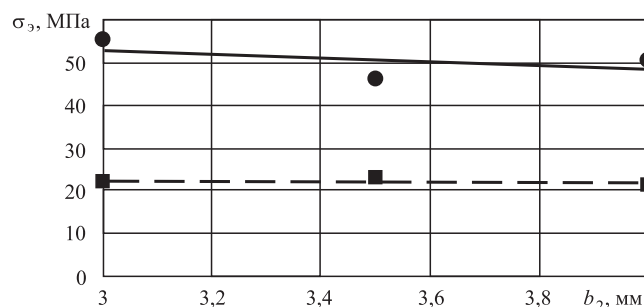


Рис. 10. Максимальные эквивалентные напряжения зон 1 (●, —) и 2 (■, — —) для зазора  $h = 0,5$  мм

напряжения увеличиваются в 2,2–2,6 раза. Для ширины проплавления 4,0 мм напряжения повышаются в 1,4–2,2 раза.

Для зазора  $h = 0,5$  мм, находящегося в допустимом диапазоне, изменение ширины проплавления не приводит к существенным изменениям напряжений (см. рис. 10).

Для исследования НДС соединений с искаженной формой шва, соответствующей примеру, показанному на рис. 2, использовали модель (рис. 11, *а*, см. обложку), имеющую площадь, аналогичную рассмотренным ранее экспериментам, и численные геометрические параметры, соответствующие требованиям НД [2].

Анализ полученных результатов моделирования показал, что для нахлесточных соединений с геометрическими параметрами, удовлетворяющими требованиям НД, напряжения для заданных параметров нагружения не превышают 60...65 МПа (см. рис. 5 и 8). Искажение формы шва, при соблюдении требований НД, может привести к увеличению напряжений,

уровень которых соответствует соединениям с параметрами, выходящими за рамки этих требований (см. рис. 11, б). Таким образом, исследование влияния прочности соединений с искаженной формой шва и оценка их качества требуют дополнительных исследований.

### Выводы

1. Согласно НД верхняя деталь нахлесточного соединения должна быть полностью проплавлена. Моделирование показало для зазора 0,5 мм увеличение напряжений в области корня шва при снижении проплавления от 100 до 50 % — от 82,75 до 118,64 МПа соответственно.

2. Для зазора 0,5 мм увеличение выпуклости шва и снижение ширины проплавления с 4 до 3 мм приводит к повышению напряжений в области корня шва от 55,12 до 74,11 МПа.

3. Оценка соответствия формы шва требованиям может быть затруднена из-за ее отклонений от типовых схем. При этом простых геометрических характеристик, таких как глубина проплавления, ширина и др., может оказаться недостаточно. Моделирование показало, что искажение формы шва при соблюдении требований к геометрическим параметрам соединения приводит к увеличению уровня на-

пряжений в корне шва от 60...65 МПа до значений свыше 100 МПа.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Компьютерное** проектирование и подготовка производства сварных конструкций: учеб. пособие для вузов / С.А. Куркин, В.М. Ховов, Ю.Н. Аксенов и др.; под ред. С.А. Куркина, В.М. Хохова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 464 с.

2. **VW 01106-1.** Stahlblechschweißverbindungen — Ausführung, Qualitätssicherung und konstruktive Gestaltung.

3. **DIN EN ISO 5817:2012.** Schweißen — Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen).

4. **ГОСТ 14771—76.** Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры.

5. **Шахматов М.В., Айметов С.Ф., Айметов Ф.Г.** Оценка несущей способности тавровых сварных соединений с непроварами в условиях вязкого разрушения при изгибе // Сварочное производство. 2008. № 4. С. 11—16.

*Константин Юрьевич Труханов, канд. техн. наук,  
konstantin.truhanov@yandex.ru;  
Всеволод Валериевич Булычев, д-р техн. наук;  
Максим Игоревич Шаталов*



**ООО "Издательство "Инновационное машиностроение"**  
продолжает подписку на журнал

### "ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ"

- За наличный и безналичный расчет
- С любого номера и на любой срок
- Без почтовых наценок

Присылайте заказ и обращайтесь за дополнительной информацией в отдел продаж, маркетинга и рекламы:

107076, г. Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2,  
тел.: (495) 785-6069,  
e-mail: realiz@mashin.ru, www.mashin.ru

О.И. Филиппов  
(ООО "Транснефтьстрой", г. Москва)

## Пути совершенствования сварочных работ при строительстве резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов

*Показано, что для дальнейшего повышения производительности сварочных работ при строительстве резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов необходимы в первую очередь разработка и внедрение высокопроизводительных способов двухсторонней сварки вертикальных швов. Отмечено, что наиболее рациональным способом повышения производительности сварки и обеспечения качества вертикальных швов на боковых стенках резервуаров является замена однодуговой автоматической сварки на многодуговую сварку в защитных газах или газовых смесях. При этом наиболее перспективен вариант синхронной сварки стыка с двух сторон. В этом случае в образовании сварного соединения участвуют попарно с обеих сторон стыка четыре дуги. Определено, что для формирования технических требований к процессу сварки и необходимому сварочному оборудованию и для их внедрения при многодуговой сварке вертикальных стыков требуется проведение комплексного исследования по установлению на основании физико-математического моделирования многопараметрической зависимости между режимами двухэлектродной сварки и качеством сварных соединений резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов.*

**Ключевые слова:** резервуар; физико-математическое моделирование; автоматическая многодуговая сварка; двухсторонняя сварка в защитных газах и газовых смесях.

*It is shown that in order to further increase the welding rate in the construction of oil product storage tanks, first of all it is necessary to develop and implement high-performance methods for double-sided arc welding of vertical joints. It is noted that the most useful technique to increase the welding rate and the quality of vertical joints on the side walls of the tanks is to replace single-arc automatic welding with multi-arc welding in gas-shielded or gas mixtures. Whereby the method exhibiting the most promise for is the double-sided synchronous welding. In this case, two arcs on the both sides of the workpiece are involved in the weld formation. It is determined that for the formation of technical requirements for the welding process and needed welding equipment, and for their implementation in multi-arc welding of vertical joints, it is necessary to conduct comprehensive study of multi-parameter relationship between the double-electrode welding modes and the quality of the welded joints in the construction of oil product storage tanks based on physical and mathematical modeling.*

**Keywords:** tank; physical and mathematical modeling; automatic multi-arc welding; double-sided gas-shielded and gas mixtures welding.

Значимую роль в приеме, хранении, технологической обработке и отпуске нефти и нефтепродуктов играют вертикальные стальные резервуары в виде объемных цилиндрических сосудов (рис. 1).

Подобные резервуары — одна из самых востребованных и распространенных разновидностей емкостного оборудования, причем в настоящее время наблюдается отчетливая тенденция к строительству резервуаров именно большой вместимости, так как эксплуатационные издержки на их содержание и обеспечение безопасного функционирования соизмеримы с издержками на резервуары меньшей вместимости.

К сожалению, резервуары являются одними из наиболее опасных промышленных объектов, аварии на которых могут привести к тя-

желым материальным, экологическим и социальным последствиям. Данные работы [1] свидетельствуют, что нарушения герметичности резервуаров могут приводить не только к их разрушению, но и к разрушению других близко расположенных резервуаров, зданий и сооружений, загрязнению почвы и водных объектов разлившейся нефтью и нефтепродуктами. Особо выделены возможное загрязнение атмосферы продуктами горения, вероятность травмирования и гибели людей. Общий материальный ущерб от подобных аварий может более чем в 500 раз превысить затраты на сооружение резервуаров [2].

Конструктивно резервуар состоит из днища, боковой вертикальной стенки и стационарной крыши. Сборка металлоконструкций



Рис. 1. Резервуарный парк хранения нефти и нефтепродуктов

осуществляется на заранее подготовленном фундаменте и основании. При строительстве применяют два способа возведения резервуаров: 1) листовая сборка и сварка готовых вальцованных листов на месте монтажа и 2) метод рулонирования [3]. Однако проблемы при развертывании толстолистовых рулонов и установке их в проектное положение привели к тому, что основным методом строительства резервуаров большой вместимости стала их листовая сборка и сварка [4]. По завершении сборки и сварки стенки в нее и крышу резервуара вваривают патрубки подвода и раздачи нефти или нефтепродуктов, смотровые люки-лазы и вентиляционные трубы. При изготовлении резервуаров в основном применяют углеродистые и низколегированные конструкционные стали обычной, повышенной и высокой прочности.

Анализ [5] технического состояния более 60 стальных резервуаров в период 2009—2014 гг. показал, что около 80 % от их общего числа имеют несоответствия требованиям промышленной безопасности. Процентное соотношение наиболее опасных дефектов и повреждений резервуаров приведено на рис. 2 [5].

Приведенные на рис. 2 данные свидетельствуют о том, что дефекты сварных соединений существенно влияют на безопасную эксплуатацию резервуаров.

В настоящее время дуговая сварка плавлением является наиболее часто используемым методом при монтаже резервуаров [6]. Вварку патрубков, вентиляционных труб, люков-лазов выполняют механизированной сваркой плавящимся электродом в активных газах и газовых смесях. При выполнении наиболее трудоемких операций, к которым относятся сварка уторного шва, соединяющего днище с боковой стенкой резервуара, сварка горизонтальных и вертикальных швов при листовой сборке, применяют механизированную и автоматическую сварку.

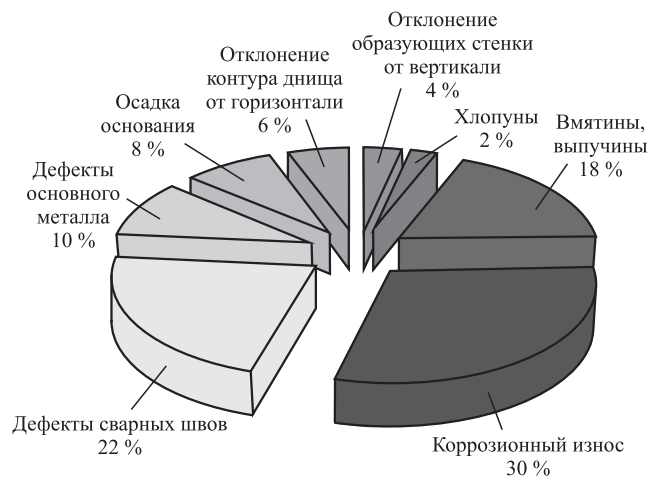


Рис. 2. Характерные дефекты и повреждения резервуаров [5]



а)



б)

**Рис. 3. Примеры осуществления сварки вертикальных стыков:**

а — механизированная сварка; б — автоматическая сварка

Примеры осуществления механизированной и автоматической сварки вертикальных стыков приведены на рис. 3.

Сварочные навесные установки укомплектовываются быстродействующими инверторными источниками, обеспечивающими управляемый каплеперенос электродного металла. При реализации процессов сварки применяют проволоки сплошного сечения (Св-08Г2С, L-56), газозащитные порошковые проволоки (FilArc, FluxoFil), самозащитную порошковую проволоку Innershield. Возможно использование и других марок проволок. При сварке проволоками сплошного сечения и газозащитными порошковыми проволоками сварку осуществляют в  $CO_2$  или газовых смесях. Сварку следует вести непрерывно до заполнения разделки.

Ориентировочные режимы механизированной сварки вертикальных стыков резервуаров приведены в табл. 1.

Ориентировочные режимы формирования корня шва при автоматической сварке вертикальных стыков резервуаров проволокой сплошного сечения приведены в табл. 2, а ориентировочные режимы заполнения разделки и выполнения облицовочного прохода самозащитной порошковой проволокой — в табл. 3. Режимы сварки в табл. 2 и 3 предоставлены канд. техн. наук О.Б. Гецкиным (НПП "Технотрон", г. Чебоксары).

Конкретные параметры режимов сварки устанавливают и фиксируют в операционных технологических картах.

### 1. Ориентировочные режимы механизированной сварки вертикальных стыков резервуаров

Слой шва	Диаметр проволоки, мм	Параметры процесса сварки				
		Скорость подачи проволоки, см/мин	Сварочный ток, А	Напряжение на дуге, В	Скорость сварки, см/мин	Вылет электрода, мм
<b>Сварка сплошной и газозащитной порошковой проволокой</b>						
Корневой	1,14	250...280	160...210	20...23	14...16	15...28
Заполняющие			190...210			
Облицовочный			150...160			
<b>Сварка порошковой самозащитной проволокой</b>						
Заполняющие	1,7	250...280	240...250	18,5...20,5	18...22	15...20
Облицовочный		200...230	210...220	17,0...18,5	20...25	10...12
Примечания. 1. Сварку осуществляют на постоянном токе обратной полярности. 2. Защитный газ при сварке сплошной и газозащитной проволокой — $CO_2$ или газовые смеси. 3. Сварку выполняют "сверху вниз", начиная с верхнего технологического участка.						

**2. Ориентировочные режимы формирования корня шва сплошной проволокой при автоматической сварке вертикальных стыков резервуаров**

Сварочный ток, А		Скорость подачи проволоки, мм/с	Параметры колебаний электрода			Скорость сварки, мм/с	Расход газа, л/мин
Базовый	В импульсе		Скорость колебаний, мм/с	Размах колебаний, мм	Задержка на кромках, с		
50...60	250...3270	45...55	12...15	0...4	0,2...0,5	2...4	15...20

Примечания. 1. Сварку осуществляют на постоянном токе обратной полярности.  
 2. Сварку выполняют "сверху вниз", начиная с верхнего технологического участка.  
 3. Защитный газ — CO<sub>2</sub> или газовые смеси.  
 4. Режим тока сварки — импульсный.  
 5. Угол наклона электрода (назад) 0...10°; рекомендуемый диаметр сплошной проволоки 1,2 мм; вылет проволоки 5...12 мм.

**3. Ориентировочные режимы заполнения разделки и выполнения облицовочного слоя шва при автоматической сварке вертикальных стыков самозащитной порошковой проволокой**

Слой шва	Сварочный ток, А	Скорость подачи проволоки, мм/с	Параметры колебаний электрода			Скорость сварки, мм/с
			Скорость колебаний, мм/с	Размах колебаний, мм	Задержка на кромках, с	
<b>Сварка самозащитной порошковой проволокой диаметром 1,7 мм</b>						
Заполняющие	210...230	45...50	26	По ширине разделки	0,2...0,4	3,0...3,4
Облицовочный	180...200	40...45	26...28			2,8...3,4
<b>Сварка самозащитной порошковой проволокой диаметром 2,0 мм</b>						
Заполняющие	230...240	30...36	24...26	По ширине разделки	0,2...0,6	3,0...3,2
Облицовочный	200...210	28...34				3,0...3,4

Примечания. 1. Сварку осуществляют на постоянном токе обратной полярности.  
 2. Сварку выполняют "снизу вверх", начиная с нижнего технологического участка.  
 3. Угол наклона электрода (назад) 0...15°; вылет проволоки 12...20 мм.

При сварке со свободным формированием швов применяют X-образную разделку. При сварке с принудительным формированием зачастую используют зазор между листами без скоса кромок. Следует отметить, что пространственное ограничение сварочной ванны при ее принудительном формировании приводит к образованию характерных несплавлений в зоне сопряжения металла сварочной ванны с основным металлом в условиях интенсивного теплоотвода от формирующих шов башмаков. Увеличение тепловложения для снижения вероятности образования несплавлений приводит к значительному перегреву металла шва и ЗТВ, необходимости проведения послесварочной термической обработки сварных соединений. Поэтому в настоящее время технологии дуговой сварки вертикальных швов с принудительным формированием практически не применяют.

При механизированной сварке вертикального стыка в X-образную разделку осуществляется ее синхронное заполнение двумя свар-

щиками. Схожая организация процесса сварки происходит и при автоматической дуговой сварке. Различие заключается в том, что при автоматической сварке вдоль каждой стороны вертикального стыка ставятся по жесткой направляющей с передвигаемой по ней кареткой. Направляющие крепятся к стенке резервуара с помощью постоянных магнитов.

Существует два конструктивных варианта такой каретки: либо на ней помимо горелки устанавливается и механизм подачи электродной проволоки с кассетой, либо на каретке крепится только держатель от стоящего рядом полуавтомата. Оба варианта перемещения горелки вдоль вертикального стыка имеют преимущества и недостатки. Вариант размещения на каретке помимо горелки и функциональных механизмов управления ею системы подачи электродной проволоки, включая механизм подачи и кассету, обладает широкими технологическими возможностями, однако все это чрезмерно утяжеляет конструкцию, что может



приводить к ее проскальзыванию на направляющей и быстрому износу. Каретка с фиксацией на ней горелки полуавтомата имеет значительно меньшие размеры и массу, однако размеры рабочей зоны ограничены длиной тракта подачи электродной проволоки. Конструктивно вариант размещения на каретке помимо горелки и функциональных механизмов управления ею системы подачи электродной проволоки во многом схож с конструкциями головок автоматов для орбитальной сварки трубопроводов.

Известно [7, 8], что вертикальные швы являются одним из наиболее слабых конструктивно-технологических узлов резервуаров, так как на их долю приходится около 15 % от общего числа выявленных дефектов. К наиболее часто встречающимся дефектам вертикальных швов относятся угловатость монтажных швов, а также непровары, поры и трещины. Если сварочные напряжения, приводящие к угловатости швов, снижают их конструктивную прочность, то дефекты формирования могут не только снижать прочность швов, но и приводить в процессе эксплуатации резервуаров к их разрушению из-за коррозионных повреждений. Поэтому трещины любых видов и размеров, несплавления, наплывы, грубая чешуйчатость, наружные поры и цепочки пор, прожоги и свищи относятся к недопустимым дефектам сварных соединений резервуаров.

Вероятность возникновения подобных дефектов при автоматической сварке значительно ниже, чем при ручной и механизированной сварке. В работе [9] отмечено, что только автоматические способы сварки реально снижают субъективное влияние исполнителей на процесс сварки, поэтому объемы их использования должны постоянно возрастать. Применяемые в настоящее время при строительстве резервуаров варианты автоматической сварки достигли своей максимальной производительности. Связано это с ограничениями по размерам сварочной ванны и тепловложению в сварное соединение. Пространственное ограничение сварочной ванны путем ее принудительного формирования из-за возможных проблем обеспечения качества соединений находит только ограниченное применение.

Таким образом, потребность в повышении производительности сварочных работ при строительстве толстостенных резервуаров большого объема актуализирует необходи-

мость разработки и внедрения более высокопроизводительных способов сварки, обеспечивающих стабильно высокое качество сварных соединений.

В последнее время для сварки металлоконструкций применяют лазерные технологии [10]. Однако их использование в монтажных условиях при низких температурах связано с определенными трудностями. Известно [11] о применении однодуговой сварки плавящимся электродом под флюсом вертикальных швов при строительстве резервуаров. Сварку осуществляют "снизу вверх" с колебаниями дуги в разделке. Однако данный способ сварки несмотря на сравнительно высокую производительность имеет недостатки, связанные с визуальным контролем за положением дуги в разделке, нерациональным расходом флюса.

Наиболее просто достичь дальнейшего повышения производительности сварки при строительстве резервуаров можно заменой однодуговой сварки на многодуговую автоматическую сварку в защитных газах или газовых смесях. Двухдуговую сварку (тандем-сварку) и двухэлектродную сварку (сварку расщепленным электродом) стали применять примерно в одно и то же время. Разница между ними заключается в том, что в первом случае каждая из двух дуг запитывается от своего источника сварочного тока, тогда как при двухэлектродной сварке используется один сварочный источник. В обоих вариантах сварки предусмотрено по две системы подачи электродной проволоки, которые подают ее в общую или отдельные ванны. Оба варианта достаточно эффективны.

Результаты работы [12] показывают, что автоматическая двухдуговая сварка в отдельные ванны позволяет не только в широких пределах регулировать термический цикл сварки, но и повысить производительность сварки до 2,5 раз в сравнении с однодуговой сваркой. Механические свойства шва и ЗТВ при двухдуговой сварке на оптимизированных режимах не уступают механическим свойствам основного металла. Значительное увеличение производительности труда за счет повышения коэффициента наплавки достигнуто при замене однодуговой сварки под флюсом на двухэлектродную сварку при сварке угловых швов мостовых конструкций [13].

В этой связи рациональным путем дальнейшего увеличения производительности процессов дуговой сварки при строительстве резер-

вуаров является промышленное применение автоматической двухдуговой сварки в раздельные ванны, так как удерживать сварочную ванну большого объема и массы при сварке вертикальных стыков достаточно проблематично. Автоматическая двухдуговая сварка вертикальных стыков может реализовываться попеременной сваркой стыка с одной, а затем с другой стороны. Однако более перспективен вариант синхронной многодуговой сварки с двух сторон стыка. В этом случае в образовании сварного соединения участвуют попарно с обеих сторон стыка четыре дуги.

Рассмотрим особенности реализации такого варианта сварки при формировании корня шва и заполнения разделки подробнее (рис. 4).

При реализации процесса сварки вторая дуга односторонней пары (см. рис. 4, а) должна размещаться на расстоянии  $L_{ef}$ , исключающем слияние сварочных ванн, это же условие должно выполняться и при формировании двухстороннего корня шва при синхронном воздействии нижней пары дуг при подаче со скоростью  $v_e$  электродной проволоки диаметром  $d_e$  (см. рис. 4, б), с обеих сторон X-образной разделки (см. рис. 4, в). При этом верхняя пара дуг при подаче со скоростью  $v_f$  электродной

проволоки диаметром  $d_f$  (см. рис. 4, б) его усиливает, участвуя в заполнении разделки с двух сторон (см. рис. 4, в). В этом случае верхняя пара дуг обеспечивает выполнение своеобразного "горячего прохода".

Таким образом, при одновременном воздействии всеми четырьмя дугами с разных сторон стыка нижняя пара дуг (см. рис. 4, в) обеспечивает формирование корня шва, а верхняя пара дуг (см. рис. 4, д) усиливает его сечение. При этом при сварке корня шва перспективно применять импульсные технологические процессы сварки [14], способствующие хорошему удерживанию сварочной ванны в разделке кромок и минимизирующих влияние магнитного дутья на блуждание дуг и разбрызгивание электродного металла.

В процессе формирования корня шва и заполнения разделки сварочные горелки размещаются под углом  $\beta$  к продольному сечению шва (см. рис. 4, б), что способствует лучшему удержанию расплава сварочной ванны. Схожие приемы используют и при заполнении разделки, однако сварку рекомендуется осуществлять "снизу вверх". При этом для уменьшения вероятности вытекания сварочной ванны целесообразно использовать сварку с поперечными колебаниями электрода и задержками его у кромок разделки (см. рис. 4, д), уменьшающих длину ванны при сохранении большой мощности сварочной дуги и вероятность несплавлений у кромок разделки.

Такая совокупность приемов с синхронным взаимодействием пар дуг с двух сторон принесет дополнительный эффект: при сварке корня — его усиление за счет дополнительного слоя электродного металла, а при заполнении разделки — термоциклирование шва и ЗТВ. Еще большая производительность предлагаемого процесса сварки будет достигнута при использовании двухсторонних зауженных U-образных разделок.

Следует отметить, что предлагаемая технология требует

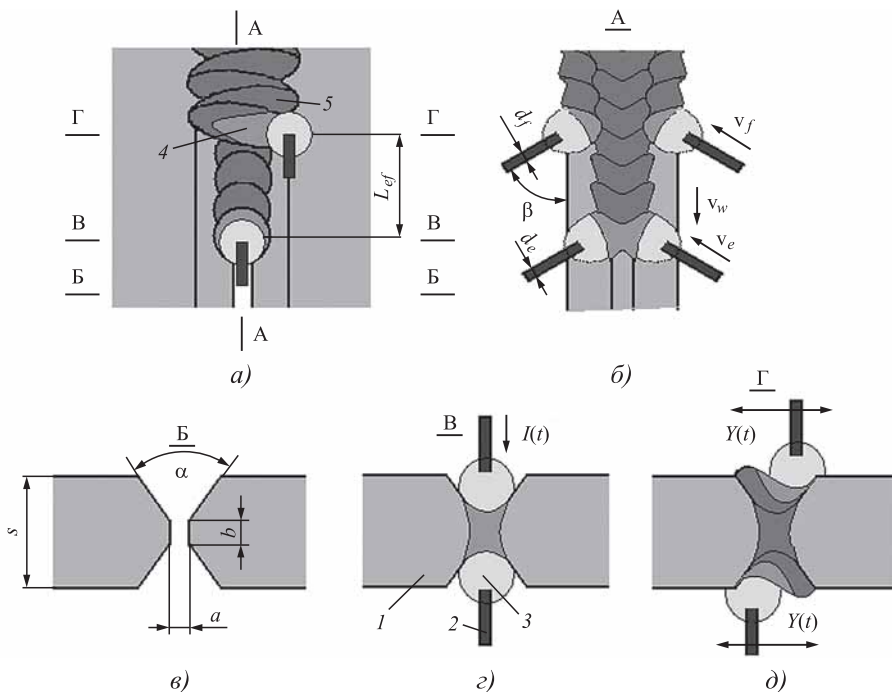


Рис. 4. Схема реализации процесса сварки вертикальных стыков (а, б), сечения стыка (в) и расположения относительно его электродов (г):

1 — свариваемые кромки; 2 — электродная проволока; 3 — дуга; 4 — сварочная ванна; 5 — шов

установления взаимозависимости и определения оптимальных значений большого числа параметров: скоростей сварки и подачи электродных проволок; энергетических характеристик процесса и тепловложения при сварке; значений напряжений и токов дуг; параметров импульсов тока и поперечных колебаний сварочных горелок; расстояния между горелками и угла их наклона относительно разделки.

Критериями оптимизации в данном случае являются характеристики формирования шва (в том числе устойчивость сварочных ванн) и чувствительность этих характеристик к неизбежным отклонениям параметров сварки от их номинальных значений, в первую очередь к качеству сборки стыка и несогласованному движению автоматов с разных сторон стыка. Только учет всех этих критериев позволяет сформулировать научно-обоснованные требования к технологиям и оборудованию для реализации автоматической двухдуговой сварки вертикальных стыков резервуаров для нефти и нефтепродуктов большого объема.

Как отмечено в работе [15], решить проблемы сварочных технологий без использования компьютерного инженерного анализа невозможно. Опыт компьютерного моделирования и анализа процессов дуговой сварки показывает, что проблема оптимизации технологии сводится к последовательному решению типовых задач: созданию физико-математической модели процесса, ее компьютерной реализации, оценке соответствия опытным данным, выполнению исследования влияния параметров сварки на показатели качества формирования шва, определению диапазона допустимых значений параметров сварки и их оптимизации, исследованию чувствительности процесса к нестабильности параметров в области оптимальных значений.

Основой всех известных моделей сварки является система уравнений теплопроводности и равновесия давлений на поверхности сварочной ванны, граничные условия которых содержат описание теплового и силового воздействий сварочной дуги, геометрию стыка и направления гравитации, а также подачу электродного металла в сварочную ванну. Несмотря на единство физических явлений, определяющих формирование сварочной ванны и шва при дуговой сварке, физико-математическая модель для проведения компьютерного анализа нуждается в доработке для учета всех специфиче-

ских особенностей рассматриваемого варианта сварки. В данном случае специфично пространственное расположение стыка.

Другим отличием данного случая сварки является необходимость рассмотрения одновременного воздействия четырех дуг при формировании усиленного корня шва, совмещенного с горячим проходом, периодически изменяющих свою тепловую мощность и силовое давление дуги. Также требует рассмотрения взаимовлияние четырех дуг на термоциклирование шва и ЗТВ при заполнении разделки. Поэтому для выполнения исследования необходимо воспроизвести изменение геометрической формы стыка при тепловом и силовом воздействиях дуг, перемещающихся вдоль вертикально расположенного стыка, их термическое воздействие на шов и ЗТВ.

Алгоритм виртуального изучения технологии многодуговой сварки вертикальных стыков приведен на рис. 5.

Исходными данными при моделировании являются теплофизические свойства стали и электродных проволок, толщина и геометрические характеристики разделки кромок



Рис. 5. Алгоритм виртуального изучения технологии двухдуговой сварки вертикальных стыков

стыка, расположение горелок относительно стыка, скорости сварки и подачи электродов, диаметры электродных проволок, параметры импульсов тока и поперечных колебаний.

Используя предлагаемый алгоритм виртуального исследования процесса автоматической двухсторонней сварки вертикальных стыков, можно решить все основные проблемы разработки технологий и необходимого оборудования для сварки вертикальных стыков толстостенных резервуаров хранения нефти и нефтепродуктов большого объема. Выполнить такие исследования могут только высокотехнологичные наукоемкие предприятия, обладающие значимым инновационным потенциалом [16].

### Выводы

1. Для снижения риска разрушения резервуаров для хранения нефтепродуктов из-за дефектов сварных швов необходимо создать эффективную технологию автоматической сварки, исключая влияние квалификации сварщиков на качество швов.

2. Наибольшие трудности возникают при сварке вертикальных швов, формирование которых в несколько проходов приводит к возникновению внутренних дефектов.

3. Для повышения производительности процесса и исключения возможности появления внутренних дефектов предложена технология сварки с расположением двух дуг каждой стороны стыка с симметричной двухсторонней разделкой.

4. При формировании корня шва первая пара дуг с обеих сторон разделки питается импульсным током и проваривает корень шва, а вторая — усиливает корень и выполняет горячий проход. Режим и расположение дуг должны исключать образование общей сварочной ванны.

5. Схожие приемы необходимо использовать и при заполнении разделки, однако сварку рекомендуется осуществлять "снизу вверх". Для уменьшения вероятности вытекания сварочной ванны сварку целесообразно осуществлять в отдельные ванны с колебаниями дуг в разделке и задержками их на кромках.

6. Для оптимизации технологии сварки вертикальных стыков необходимо выполнить компьютерный инженерный анализ влияния технологических параметров на показатели качества формирования шва.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Швырков С.А., Семиков В.Л., Швырков А.Н. Анализ статистических данных разрушений резервуаров // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. 1996. № 5. С. 39—50.
2. Кондрашова О.Г., Назарова М.Н. Причинно-следственный анализ аварий вертикальных стальных резервуаров // Нефтегазовое дело. 2004. № 2. С. 36—43.
3. Дорошенко Ф.Е. Современное состояние резервуаростроения в России // Монтажные и специальные работы в строительстве. 2012. № 6. С. 2—5.
4. Волчков А.Р. Методы монтажа вертикальных цилиндрических резервуаров, возможные альтернативы // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2013. № 3. С. 110—113.
5. Сафина И.С., Каузова П.А., Гушин Д.А. Оценка технического состояния резервуаров вертикальных стальных // ТехНАДЗОР. 2016. № 3. С. 40—41.
6. Куприянов Д.В., Решанов В.А. Сварка в защитных газах резервуаров объемом 20 тыс. м<sup>3</sup>, собираемых полистовым методом // Сварочное производство. 2001. № 9. С. 27—30.
7. Разработка современных методик диагностики сварных соединений резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов методом ультразвукового контроля / П.С. Кунина, Е.И. Величко, М.Г. Приходько, А.Е. Нижник // Территория Нефтегаз. 2017. № 1. С. 20—24.
8. Гончаров Н.Г., Нестеров Г.В., Юшин А.А. Исследование дефектов сварных швов резервуаров вертикальных стальных // Безопасность труда в промышленности. 2019. № 3. С. 69—74.
9. Kah P., Martikainen J. Current trends in welding processes and materials: Improve in effectiveness // Reviews on advanced Materials Science. 2011. 30 (2). P. 198—200.
10. Алешин Н.П., Лысак В.И., Лукьянов В.Ф. Современные способы сварки: учебное пособие. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 58 с.
11. Development of vertical submerged arc welding method for aboveground LNG storage tank construction / R. Sakamoto, K. Kobayashi, T. Iijima, Y. Nishimura, Y. Mizo // Ishikawajima-Harima Engineering Review. 2010. 43 (2). P. 55—62.
12. Шолохов М.А. Перспективные технологии и оборудование для сварки по узкому зазору корпусных конструкций специальной техники // Сварка и диагностика. 2015. № 5. С. 46—51.
13. Мосин А.А. Возможность повышения производительности сварки протяженных угловых швов мостовых металлоконструкций (обзор) // Сварка и диагностика. 2020. № 1. С. 50—54.
14. Совершенствование высокопроизводительных процессов импульсной дуговой сварки в защитных газах / А.М. Фивейский, Д.С. Бузорина, А.Ю. Мельников, А.Е. Филяков // Сварка и диагностика. 2016. № 6. С. 53—55.
15. Полосков С.С., Шолохов М.А., Ерофеев В.А. Физико-математическая модель дугового взаимодействия при наплавке плавящимся электродом с доплавкой присадочной проволокой // Сварка и диагностика. 2019. № 6. С. 27—31.
16. Полосков С.С. Значимость высокотехнологичных наукоемких предприятий для инновационной экономики России // Сборник материалов национальной научно-практической конференции "Наука, образование и инновации в современном мире". Воронеж: ВГАУ им. Императора Петра I, 2018. С. 235—239.

Олег Иванович Филиппов,  
foirus@yandex.ru



С.Н. Ларин, В.И. Трегубов (Тульский государственный университет),  
А.Н. Исаева (АО "НПО "СПЛАВ" имени А.Н. Ганичева", г. Тула)

## Математическая модель комбинированного выдавливания прутковой заготовки в цилиндрическую матрицу пуансоном с плоской рабочей поверхностью\*

Процессы комбинированного выдавливания могут быть востребованными при производстве корпусных изделий с перемычкой в центральной части и тонкими стенками. Часто для их промышленной реализации требуется теоретическое обоснование силовых режимов. В связи с этим на базе метода верхних оценок создана математическая модель комбинированного выдавливания. На базе полученных выражений для оценки давления установлено влияние технологических параметров на давление выдавливания.

**Ключевые слова:** комбинированное выдавливание; сила; исследование; обработка давлением.

Combined extrusion processes can be in demand in the production of body products with jumper in the central part and thin walls. Often, their industrial implementation requires theoretical justification of power regimes. Mathematical model of combined extrusion created on the basis of the upper estimates method is presented. The effect of technological parameters on extrusion force is established based on the obtained expressions for pressure estimation.

**Keywords:** combined extrusion; force; study; plastic metal working.

В патронно-гильзовом производстве для гражданского применения широко распространены процессы обработки давлением [1–3]. Для изготовления гильз эффективно применение комбинированного выдавливания. Данный способ позволяет добиться значительных степеней формообразования [4, 5]. Однако этот метод требует уточнения силовых режимов ввиду значительных нагрузок, возникающих при его реализации. Поэтому в статье решена задача, заключающаяся в создании математической модели для научного обоснования силовых режимов комбинированного выдавливания.

Для создания математической модели комбинированного выдавливания был использован энергетический метод разрыва скоростей,

основанный на решении уравнения равновесия [6–8]:

$$N_{\text{вн}} = \int \frac{NdW}{W}, \quad (1)$$

где  $N_{\text{вн}}$  — мощность внешних сил;  $N$  — мощность деформирования;  $W$  — объем деформируемого тела.

При расчете считаем, что деформированное состояние плоское, материал жесткопластический, упругими деформациями пренебрегаем. Для плоского деформированного состояния выражение для оценки давления комбинированного выдавливания, полученное на основе уравнения равновесия (1), имеет вид [6–8]

$$\frac{p}{2k} = \frac{1}{2Fv_0} \left( \sum_{ij}^{n_1} l_{ij} [v_{ij}] + \mu \sum_j^{n_2} l_j [v_j] \right), \quad (2)$$

где  $k = \sigma_s / \sqrt{3}$ ;  $\sigma_s$  — условный предел текучести;  $F$  — площадь приложения нагрузки

\* Работа выполнена в рамках гранта РФФИ 20-08-00401.

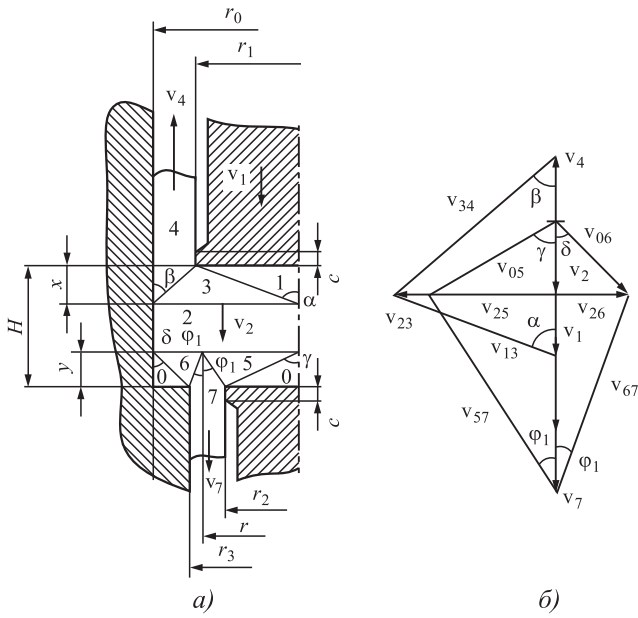


Рис. 1. Схема комбинированного выдавливания (а) и годограф скоростей (б)

деформирующим инструментом;  $v_0$  — скорость перемещения пуансона;  $v_{ij}$  — скорость на границах блоков деформации;  $v_j$  — скорость в блоках деформации;  $l_{ij}$  — длина поверхности разрыва скоростей;  $l_j$  — длина границ между блоками;  $\mu$  — коэффициент трения.

На рис. 1 представлены схема исследуемого процесса с разрывным полем скоростей и годограф скоростей.

Мощности на линиях разрыва 13, 23, 34 и 04 запишем в виде

$$N_{13} = kl_{13}v_{13} = k\sqrt{r_1^2 + x^2} (v_1 - v_2) \frac{\sqrt{r_1^2 + x^2}}{x};$$

$$N_{23} = kl_{23}v_{23} = kr_0 (v_1 - v_2) \frac{r_1}{x};$$

$$N_{34} = kl_{34}v_{34} = k\sqrt{x^2 + (r_0 - r_1)^2} (v_1 - v_2) \frac{r_1}{x} \frac{\sqrt{x^2 + (r_0 - r_1)^2}}{r_0 - r_1};$$

$$N_{04} = \mu kl_{04}v_{04} = \mu kc (v_1 - v_2) \frac{r_1}{r_0 - r_1},$$

где  $c$  — длина контактной поверхности трения.

Мощности на линиях разрыва 25, 05, 57 и 07:

$$N_{25} = kl_{25}v_{25} = kr v_2 \frac{r_2}{y};$$

$$N_{05} = kl_{05}v_{05} = k\sqrt{y^2 + r_2^2} v_2 \frac{\sqrt{y^2 + r_2^2}}{y};$$

$$N_{57} = kl_{57}v_{57} = k\sqrt{y^2 + (r - r_2)^2} v_2 \frac{r_2 \sqrt{y^2 + (r - r_2)^2}}{y(r - r_2)};$$

$$N_{07} = \mu kl_{07}v_7 = k\mu c \frac{v_2 r}{(r - r_2)}.$$

Мощности на линиях разрыва 26, 06, 67 и 07:

$$N_{26} = kl_{26}v_{26} = k(r_0 - r) v_2 \frac{r_0 - r_3}{y};$$

$$N_{06} = kl_{06}v_{06} = k\sqrt{y^2 + (r_0 - r_3)^2} v_2 \frac{\sqrt{y^2 + (r_0 - r_3)^2}}{y};$$

$$N_{67} = kl_{67}v_{67} = k\sqrt{y^2 + (r_3 - r)^2} v_2 \frac{r_0 - r_3 \sqrt{y^2 + (r_3 - r)^2}}{y(r_3 - r)};$$

$$N_{07} = \mu kl_{07}v_7 = \frac{k\mu c v_2 r + k\mu c v_2 r_0}{(r_3 - r)}.$$

В соответствии с уравнением (2) запишем выражение для оценки давления при истечении металла в сторону, противоположную движению инструмента:

$$p_{обр} = \frac{(v_1 - v_2)(\mu c r_1 x + 2r_0^2 r_1 - 2r_0 r_1^2 + r_0 x^2)}{2x(r_0 - r_1)r_1 v_1}, \quad (4)$$

а также для оценки давления при истечении металла по направлению движения инструмента:

$$p_{пр} = \frac{(-15r_2^4 + (16r_0 + 44r_3 + 12)r_2^3 + Ar_2^2 + Br_3 + C + 16r_0^3 - 4r_0^2 + (80\mu c y + 16y^2)r_0 + 64y^2)r_2}{8y(r_0 + 3r_2 - r_3)(3r_3 + r_0 - r_2)r_0} - \frac{15r_3^4 + (52r_0 - 15)r_3^3 + Dr_3^2 + Er_3 + 9r_0^4 + (24\mu c y + 8y^2)r_0^2}{8y(r_0 + 3r_2 - r_3)(3r_3 + r_0 - r_2)r_0}, \quad (5)$$

где  $A = -10r_3^2 + (36r_0 - 52)r_3 - 26r_0^2 - 8r_0 +$   
 $+24y(c\mu - y)$ ;  $B = 44r_3^3 + (-120r_0 + 52)$ ;  
 $C = (60r_0^2 + 16y(c\mu + 5y))$ ;  
 $D = (-50r_0^2 + 8r_0 - 8y(c\mu + 3y))$ ;  
 $E = (4r_0^3 + 3r_0^2 - 16y(c\mu - y)r_0 - 64y^2)$ .

Приравняв выражения (4) и (5), найдем значение скорости  $v_2$ . Подставив ее значение в выражение (4) и минимизировав его по параметрам  $x$  и  $y$  путем дифференцирования, вычислим удельное давление выдавливания. Полученное выражение позволяет оценить влияние степени деформации и параметров трения на удельное давление. При расчетах приняли следующие размеры инструмента:  $r_0 = 35$  мм;  $r_1 = 20...32$  мм;  $r_2 = 20$  мм;  $r_3 = 24...30$  мм;  $h = 3...15$  мм. Варьировали коэффициент трения, значение которого оценивали по закону Прандтля.

На рис. 2 приведены зависимости, позволяющие установить влияние относительной толщины верхней стенки на удельное давление выдавливания.

Анализ полученной зависимости позволил выявить, что с ростом относительной величины  $r_1/r_0$  до 0,5 удельное давление начинает снижаться на 20 %, а затем наблюдается его резкий рост. Для значений  $r_2/r_3 = 0,65$  и  $0,75$  удельное давление увеличивается в 1,8 раза, для  $r_2/r_3 = 0,85$  оно повышается в 2 раза. Рост величины  $r_2/r_3$  также приводит к увеличению давления. С повышением  $r_2/r_3$  от 0,65 до 0,85 удельное давление возрастает в 2,2 раза.

На рис. 3 представлены зависимости, позволяющие установить влияние коэффициен-

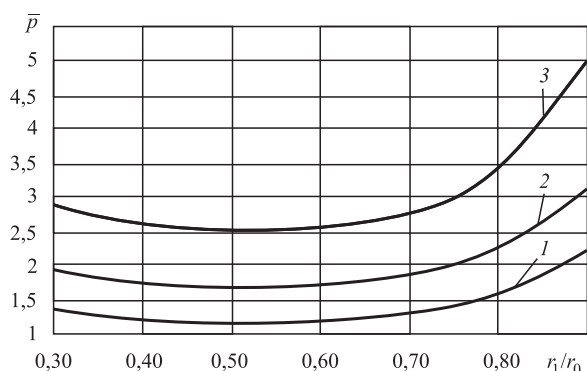


Рис. 2. Влияние относительной толщины стенки  $r_1/r_0$  на удельное давление  $\bar{p}$  при выдавливании:  
 1 —  $r_2/r_3 = 0,65$ ; 2 —  $r_2/r_3 = 0,75$ ; 3 —  $r_2/r_3 = 0,85$

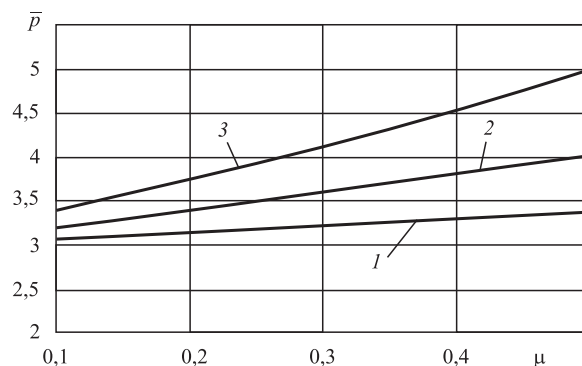


Рис. 3. Влияние коэффициента трения  $\mu$  и длины контактной поверхности трения  $c$  на удельное давление  $\bar{p}$  при комбинированном выдавливании:

1 —  $c = 3$  мм; 2 —  $c = 15$  мм; 3 —  $c = 30$  мм

та трения и длины контактной поверхности трения на удельное давление при комбинированном выдавливании.

Из рис. 3 видно, что увеличение коэффициента трения приводит к росту удельного давления, но в зависимости от значений длины поверхности трения пуансона по-разному. Для длины  $c = 3$  мм с повышением коэффициента трения от 0,1 до 0,5 удельное давление увеличивается на 8 %. Для  $c = 15$  мм давление возрастает на 25 %, для  $c = 30$  мм — на 35 %. Очевидно, что такое различное влияние коэффициента трения можно связать с изменением площади контактного трения на пуансоне.

**Закключение.** Посредством решения уравнения равновесия получено выражение для оценки удельного давления при комбинированном выдавливании стальных прутковых заготовок. Данное выражение можно использовать для установления силовых режимов схожих по конфигурации изделий. Установлено влияние соотношений геометрических параметров выдавливаемого изделия и параметров трения на удельное давление.

Предлагаемый технологический процесс состоит из изготовления изделия (рис. 4, а) из следующих операций:

- 1) отрезка прутка;
- 2) термическая обработка;
- 3) комбинированное выдавливание инструментом с плоской рабочей поверхностью (рис. 4, б) на прессе ВР-51;
- 4) термическая обработка;
- 5) вытяжка полуфабриката на прессе ВР-51;
- 6) подрезка торца;
- 7) формоизменение фланцевой части на прессе ВР-51;

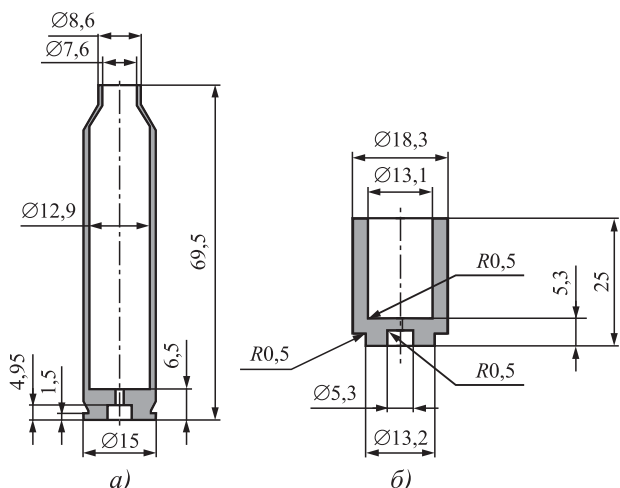


Рис. 4. Эскиз получаемой детали (а) и полуфабриката после выдавливания (б)

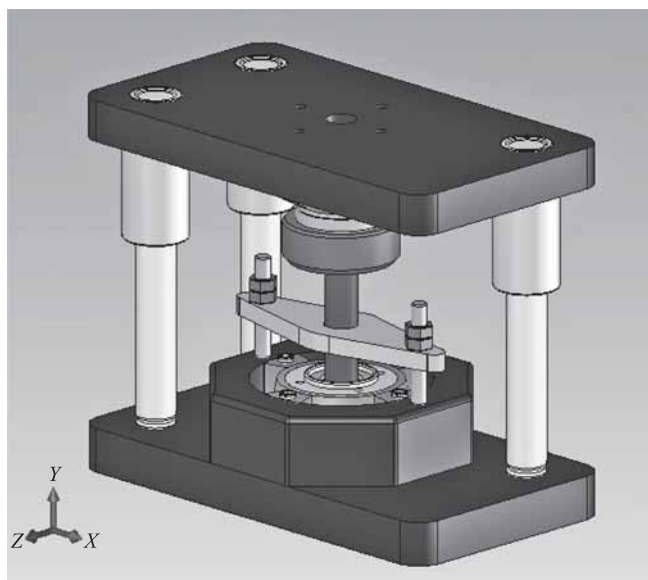


Рис. 5. Модель штампа для комбинированного выдавливания

- 8) пробивка отверстия в дне изделия на прессе ВР-51;
- 9) обжим цилиндрической части на прессе ВР-51;
- 10) подрезка торца обжатой части.

Для осуществления предлагаемой технологии предполагается использование штампа для комбинированного выдавливания, модель которого показана на рис. 5 [6—8]. Равностенность получаемых полуфабрикатов обеспечи-

вается за счет того, что в штампе применяется специальное центрирующее приспособление.

Полученные результаты можно использовать при разработке технологий комбинированного выдавливания в матрицу цилиндрической формы как рекомендации для оценки силовых параметров.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Яковлев С.П., Яковлев С.С., Андрейченко В.А. Обработка давлением анизотропных материалов. Кишинев: Квант, 1997. 332 с.
2. Чудин В.Н., Пасынков А.А. Нестационарные процессы изотермической штамповки // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2018. № 6. С. 23—28.
3. Пасынков А.А., Борискин О.И., Ларин С.Н. Теоретические исследования операции изотермической раздачи труб из труднодеформируемых цветных сплавов в условиях кратковременной ползучести // Цветные металлы. 2018. № 2. С. 74—78.
4. Методика экспериментального определения механических и пластических свойств материала при растяжении с повышенной температурой / В.А. Демин, А.В. Черняев, В.И. Платонов, В.А. Коротков // Цветные металлы. 2019. № 5. С. 66—73.
5. Определение влияния скорости деформации на сопротивление деформированию при статическом растяжении с повышенной температурой / А.В. Черняев, Н.А. Усенко, В.А. Коротков, В.И. Платонов // Цветные металлы. 2019. № 5. С. 60—66.
6. Крутиков П.В. Холодное выдавливание сложнопрофильных изделий // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2005. № 1. С. 9—17.
7. Евдокимов А.К., Назаров А.В. Учет противодействия при обратном выдавливании с активным трением // Заготовительные производства в машиностроении. 2007. № 11. С. 28—35.
8. Евдокимов А.К., Петров Б.В. Механизм образования утяжины в ступенчатой стенке выдавленного стакана // Известия ТулГУ. Серия "Механика деформированного твердого тела и обработка металлов давлением". 2004. Вып. 3. С. 74—81.

*Сергей Николаевич Ларин, д-р техн. наук,  
mpf-tula@ Rambler.ru;  
Виктор Иванович Трегубов, д-р техн. наук;  
Анна Николаевна Исаева*





УДК 621.771.23

DOI: 10.36652/1684-1107-2020-18-7-313-318

**Е.А. Максимов** (ЗАО "Интрай", г. Челябинск),  
**Р.Л. Шаталов** (Московский политехнический университет),  
**Е.П. Устиновский** (Южноуральский государственный университет, г. Челябинск)

## Определение настроечного зазора при правке листового проката на роликовой правильной машине

*Анализ конструкций роликовых правильных машин (РПМ) для правки листа показал, что по принципу регулировки зазора между роликами машины выполняют двух типов: с параллельным и наклонным расположением роликов. Приведены зависимости для расчета кривизны обратного перегиба, настроечного зазора для РПМ с горизонтальным и наклонным расположением роликов. Опытная правка проведена на 7-роликовой правильной машине ПАО "Северсталь" при правке листов из стали 10 толщиной 16 мм и шириной 2400 мм. Сравнение результатов опытного значения зазора 13,1 мм и расчетного значения 12,8 мм показало расхождение 4,5 %.*

**Ключевые слова:** правка листового проката; роликовая правильная машина с параллельным и наклонным расположением роликов; методика расчета настройки РПМ.

*The designs analysis of roller-type straightening machine for sheet straightening showed that by positive allowance adjustment principle between machine rollers, two types are performed: with parallel and inclined rollers. Dependences for calculations of return bend curvature, adjusting positive allowance for parallel and inclined rollers roller-type straightening machine are presented. Pilot straightening is carried on 7-roller straightening machine at straightening of sheets from 10 steel with thickness of 16 mm and width of 2400 mm. Comparison of results of the experimental value of positive allowance of 13.1 mm and the calculated value of 12.8 mm showed 4.5 % divergence.*

**Keywords:** sheet products straightening; parallel and inclined rollers roller-type straightening machine; design procedure of roller-type straightening machine adjustment.

**Введение.** Недостаточное теоретическое исследование плоскостности листового проката сдерживает темпы разработки инновационных технологий в машиностроении. В настоящее время многие теоретические вопросы расчета параметров в правке изучены пока недостаточно. Вместе с тем разработку режимов правки проката и оценку методов управления его качеством проводят с помощью программного обеспечения на основе цифровых технологий.

В этой связи дальнейшее исследование закономерностей прокатки и правки листового проката, разработка новых технологий в прокатно-правильном производстве, создание

нового оборудования имеют важное научное и практическое значение.

Правка листа на *роликовой правильной машине* (РПМ) состоит из следующих операций: на первых роликах устраняется максимальная кривизна обоих знаков, на последующих роликах выправляется максимальная остаточная кривизна, возникающая в результате изгиба участка на предыдущем ролике. Таким образом, на каждом последующем ролике изгиб листового проката уменьшается.

Большинство РПМ имеют горизонтальное расположение роликов [1–3]. Такие конструкции РПМ имеют параллельную настройку зазора между роликами. Во многих РПМ уста-

новлены механизмы, позволяющие проводить наклонную настройку роликов [4—7].

В РПМ с наклонной настройкой ролики расположены под небольшим углом друг к другу с увеличением расстояния между рядами роликов к выходной стороне. При этом кривизна перегиба листа постепенно уменьшается и на предпоследнем ролике становится близкой к кривизне упругого изгиба. Например, в 17-роликовой правильной машине с наклонным расположением роликов между первыми роликами лист получает максимальный изгиб. Далее, по мере продвижения листа по направлению правки его изгиб уменьшается, у последних роликов лист выправляется.

На РПМ с горизонтальным расположением роликов настроечный зазор между нижним и верхним рядами роликов устанавливается путем изменения положения верхней траверсы [8—13].

Изменяя настроечный зазор между роликами, регулируют давление правки при деформации листов различной толщины и ширины.

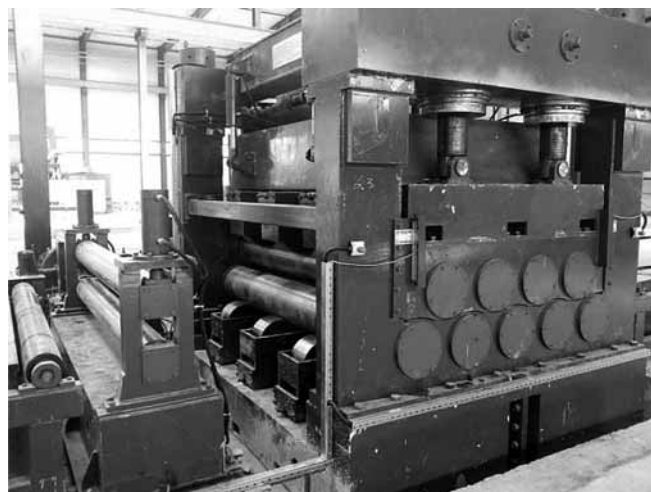
Принципиальная схема РПМ для правки листового проката представлена на рис. 1.

**Техническая характеристика  
7-роликовой правильной машины  
с горизонтальным расположением роликов**

Максимальная ширина листа, мм	3200
Максимальная толщина листа, мм	32
Предел текучести проката, МПа	340
Скорость правки, м/мин	12,0
Число роликов:	
рабочих	7
направляющих	2
Диаметр роликов, мм:	
правильных	290
направляющих	345
Длина роликов, мм	3800
Шаг между осями роликов, мм	380
Ход верхних правильных роликов, мм	30...130

*Цель исследования* — определение настроечного зазора при правке листового проката на роликовой правильной машине.

**Аналитические исследования и их обсуждение.** Известно, что эффективность правки определяется кривизной перегиба листа в роликах и числом роликов в РПМ [9—13]. Кривизна перегиба листа в роликах РПМ зависит от исходной кривизны листов перед правкой. Для толстолистового проката, имеющего меньшую исходную кривизну, требуется меньшая кривизна перегиба и меньшее число роликов в РПМ, чем при правке тонколистового проката.



**Рис. 1. Типовая 9-роликовая правильная машина для правки листового проката с горизонтальным расположением роликов**

При правке кривизна перегиба листа не может превышать максимальную кривизну упругого изгиба, так как при большем изгибе плоскостные (прямые) участки листа получили бы некоторую остаточную кривизну [14—18].

При прохождении между роликами РПМ искривленные участки листа изгибаются на суммарную кривизну, складывающуюся из кривизны от распрямления и кривизны от обратного перегиба. При этом искривленные участки получают пластическую деформацию изгиба. Однако полного выпрямления листа не происходит, так как кривизна пружинения искривленных участков больше кривизны перегиба.

Остаточные напряжения, возникающие вследствие влияния деформации выпрямления искривленных участков, устраняются при многократном знакопеременном изгибе. Многороликовые РПМ по принципу регулировки зазора между роликами выполняют двух типов: с параллельным и наклонным расположением роликов. При правке листа знакопеременным изгибом поочередно пластически растягиваются сначала верхняя, а затем нижняя зоны поперечного сечения листа плоскостных участков. При этом искривленные участки листа будут деформироваться только упруго, так как в них возникают только упругие деформации. При правке плоскостные участки листа удлиняются, а длина криволинейных участков не изменяется. Как только длины плоскостных и криволинейных участков будут одинаковыми, происходит выправление листа.

Определим кривизну изгиба листа, кривизну обратного перегиба листа, а также зазор между роликами для РПМ с горизонтальным и наклонным расположением роликов.

Известно, что основным технологическим параметром, определяющим возможность получения плоскостного листа, является кривизна обратного перегиба. Необходимая кривизна обратного перегиба является функцией нескольких переменных

$$\frac{1}{\rho_{o.пр}} = f\left(\sigma_s, h, \frac{1}{\rho_0}\right), \quad (1)$$

где  $\sigma_s$  — предел текучести материала проката;  $h$  — толщина листа;  $\frac{1}{\rho_0}$  — кривизна листа в исходном состоянии.

С другой стороны, для плоской деформации можно записать

$$\frac{1}{\rho_{o.пр}} = \frac{M}{EI}, \quad (2)$$

где  $M$  — изгибающий момент;  $EI$  — жесткость поперечного сечения листа.

Момент внутренних сил для упругопластического изгиба определяется при решении уравнения момента внутренних сил

$$M_{ys} = 2b \int_0^{Z_0} \sigma_Z Z dZ + 2b \int_{Z_0}^{0,5h} \sigma_s Z dZ, \quad (3)$$

где  $b$  — ширина листа;  $Z_0$  — граница между упругой и пластической областью при изгибе под роликами РПМ;  $\sigma_Z$  — напряжения в листе при его изгибе по вертикальной координате;  $Z$  — вертикальная координата.

Предел текучести материала листа запишем в виде:

для упругой области

$$\sigma_Z = E \frac{Z}{\rho_{o.пр}}, \quad (4)$$

для пластической области

$$\sigma_s = \sigma_{s0} + A \left( \frac{Z}{\rho_{o.пр}} \right)^2, \quad (5)$$

где  $\sigma_{s0}$  — предел текучести материала проката в исходном состоянии;  $A$  — коэффициент упрочнения материала проката при линейном упрочнении.

Подставляя (5) и (3) после интегрирования, получаем

$$M_{ys} = 2b \left( \frac{EZ_0^3}{3\rho_{o.пр}} + \sigma_s (0,5h - Z_0)^2 + \frac{A}{4\rho_{o.пр}^2} (0,5h - Z_0)^4 \right). \quad (6)$$

Подставляя (6) в (2), получаем

$$\frac{1}{\rho_{o.пр}} = \frac{M}{EI}. \quad (7)$$

Особенностью правки листа на РПМ является то, что все участки листа в процессе правки получают одинаковую кривизну под нагрузкой. В то же время кривизна листа на разных участках по длине различная. Поэтому при правке листа на РПМ невозможно обеспечить для каждого участка оптимальный перегиб. Эффективность правки листа можно оценивать в виде разности между максимальной кривизной и кривизной на его отдельных участках.

Проведем оценку эффективности правки по трем способам:

1) ролики РПМ настраивают таким образом, что прямолинейные (плоскостные) участки листа не получают пластическую деформацию, а криволинейные участки частично выправляются;

2) максимально искривленные участки листа полностью выправляются, а прямолинейные — приобретают кривизну;

3) все участки листа получают пластическую деформацию, а затем устраняется приобретенная кривизна.

Измерения кривизны листа до и после правки показали, что первый способ правки обеспечивает лучшее выправление, чем второй способ при радиусе исходной кривизны менее  $2000h$ . При большей кривизне второй способ эффективнее, чем первый способ. Опытные правки показали, что первый и второй способы эффективны при очень малых исходных искривлениях. На практике при больших искривлениях наиболее эффективен третий способ правки.

На основании теоремы о разгрузке А.А. Ильюшина [3] полная кривизна перегиба листа определяется как

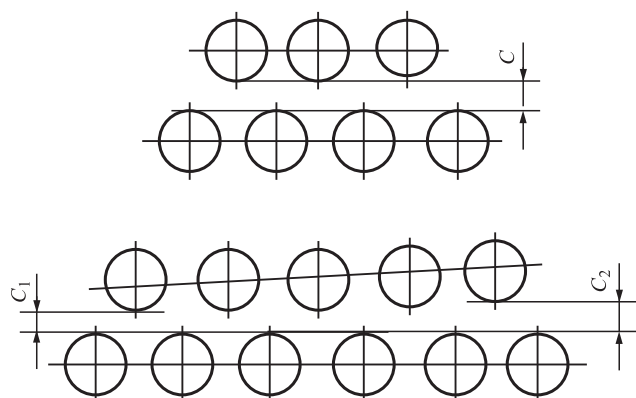


Рис. 2. Схемы РПМ с горизонтальным (а) и наклонным (б) расположением роликов

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_0} + \frac{1}{\rho_{o.пр}} \quad (8)$$

Для третьего способа правки уравнение (8) запишем в виде

$$\frac{1}{\rho_{o.к}} = \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_{o.пр}}, \quad (9)$$

где  $\frac{1}{\rho_{o.к}}$  — остаточная кривизна листа.

Формула (9) позволяет определять остаточную кривизну листа после правки на РПМ.

Схемы РПМ с горизонтальным и наклонным расположением роликов приведены на рис. 2.

Зазор для РПМ с горизонтальным расположением роликов РПМ определим по формуле

$$C = h - \Delta Z - \frac{T^2}{16\rho}, \quad (10)$$

где  $\Delta Z$  — износ по длине бочки ролика;  $T$  — шаг роликов РПМ;  $\rho$  — радиус кривизны листа при правке на РПМ.

Радиальный износ, мм

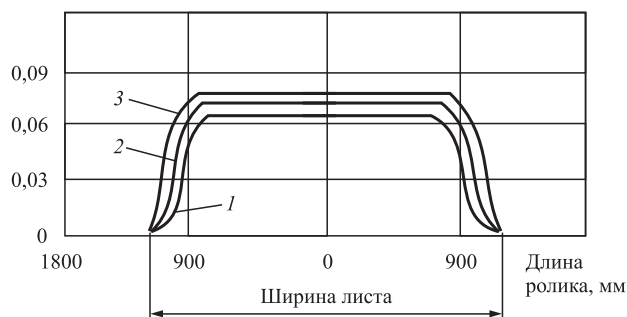


Рис. 3. Профилограмма износа по длине бочки ролика для второго ролика 7-роликовой правильной машины:

1 —  $L = 22\,000$  м; 2 —  $23\,000$  м; 3 —  $25\,000$  м

Радиус кривизны листа под вторым роликом РПМ выбирают по табл. 1.

В формуле (10) для листов с сильным искривлением принимают величину  $\rho_{\min}$ , для листов с небольшим искривлением — величину  $\rho_{\max}$ .

Для расчета зазора (10) для РПМ с горизонтальным расположением роликов необходимо знать износ по длине бочки ролика [7].

Исследование износа бочки роликов проводили на 7-роликовой правильной машине. Профиль роликов после правки листового проката измеряли прибором контроля формы мод. 08500 (класс точности А) по 30 равноудаленным точкам по длине бочки. В результате экспериментов были построены профилограммы (рис. 3).

Износ по длине бочки ролика:

$$\Delta Z = -0,1347 + 9,013x \cdot 10^{-5} P + 2,52x \cdot 10^{-6} L + 0,00010\sigma_s, \quad (11)$$

где  $P$  — сила правки, кН;  $L$  — суммарная длина листов, обрабатываемых на РПМ, м.

1. Радиусы кривизны  $\rho_{\min}$  для листов с сильным искривлением и  $\rho_{\max}$  для листов с небольшим искривлением для различных сталей

Марки стали	$\rho_{\min}/\rho_{\max}$ при $h$ , мм					
	10	12	14	16	20	25
10ХСНД, 15ХСНД	1320/2570	1580/3080	1850/3600	2110/4110	2640/5140	3300/6420
10Г2С1Д	1220/2250	1460/2700	1710/3150	2440/4500	2440/4500	3050/5610
12Г2МФТ	1120/1800	1340/2160	1570/2520	2240/3600	2240/3600	3360/5400
14Х2ГМР	1020/1500	1220/1800	1430/2100	2040/3000	2040/3000	3060/4500

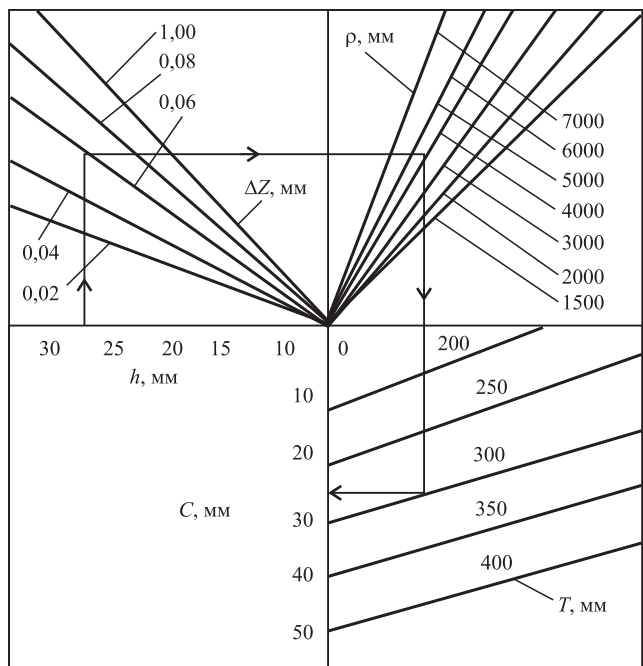


Рис. 4. Номограмма определения настроечного зазора между роликами РПМ

Кроме проверки достоверности коэффициентов уравнения (11) были определены показатели значимости входящих в них факторов с использованием критерия Стьюдента. Анализ показал, что все факторы, входящие в уравнения регрессии (11), являются значимыми. Номограмма определения настроечного зазора между роликами РПМ показана на рис. 4. Расчет настроечного зазора между роликами по номограмме указан стрелками. Для толщины листа  $h = 28$  мм,  $\rho_{\max} = 3000$  мм,  $T = 300$  мм,  $\Delta Z = 0,06$  мм значение настроечного зазора между роликами составляет  $Z_2 = 26,2$  мм.

Оптимальные значения зазоров для РПМ с горизонтальным расположением роликов приведены в табл. 2.

Анализ параметров, представленных в табл. 2, показал, что при уменьшении толщины листа от 40 до 12 мм зазор снижается: для стали 10ХСНД с 38,8 до 7,8 мм; для стали 10Г2С1Д с 38,6 до 7,2 мм; для стали 14Х2ГМР с 38,6 до 6,2 мм.

Зазоры для РПМ с наклонным расположением роликов определим по следующим формулам:

$$C_1 = \frac{C_{\min}(2n - 3) - C_{\max}}{2n - 4}; \quad (12)$$

$$C_2 = \frac{C_{\max}(2n - 3) - C_{\min}}{2n - 4},$$

2. Оптимальные зазоры, мм, для РПМ с горизонтальным расположением роликов

h, мм	Марки стали			
	10ХСНД, 15ХСНД	10Г2С1Д	12Г2МФТ	14Х2ГМР
40	38,8	38,6	38,7	38,6
36	34,6	34,4	34,3	34,2
32	30,4	30,2	30,0	29,6
28	26,2	26,9	25,8	25,6
22	19,7	19,5	19,3	19,1
16	12,8	12,4	12,1	11,8
12	7,8	7,2	6,8	6,3

где  $C_1$  — зазор под вторым роликом;  $C_2$  — зазор под предпоследним роликом;  $C_{\min}$ ,  $C_{\max}$  — минимальный и максимальный зазор под третьим роликом;  $n$  — число роликов в верхнем ряду.

Оптимальные значения зазоров для РПМ с наклонным расположением роликов представлены в табл. 3.

Анализ параметров, приведенных в табл. 3, показал, что при правке на РПМ с наклонным расположением роликов для листа толщиной 20 мм из стали 10ХСНД минимальный зазор составляет  $C_{\min} = 19,6$  мм, максимальный зазор  $C_{\max} = 20,0$  мм; из стали 10Г2С1Д  $C_{\min} = 19,5$  мм,  $C_{\max} = 20,0$  мм; из стали 12Г2МФТ  $C_{\min} = 19,3$  мм,  $C_{\max} = 19,9$  мм.

Для листа толщиной 8 мм из стали 10ХСНД минимальный зазор составляет  $C_{\min} = 7,0$  мм, максимальный зазор  $C_{\max} = 7,9$  мм; из стали 10Г2С1Д  $C_{\min} = 6,7$  мм,  $C_{\max} = 7,8$  мм; из стали 12Г2МФТ  $C_{\min} = 6,5$  мм,  $C_{\max} = 7,9$  мм.

3. Оптимальные зазоры  $C_{\min}/C_{\max}$ , мм, для РПМ с наклонным расположением роликов

h, мм	Марки стали		
	10ХСНД, 15ХСНД	10Г2С1Д	12Г2МФТ
20	19,6/20,0	19,5/20,0	19,3/19,9
18	17,6/18,0	17,4/18,0	17,3/17,8
16	15,6/16,0	15,4/16,0	15,2/15,0
14	13,0/13,9	13,5/13,9	13,0/13,9
12	11,4/11,9	11,2/11,9	11,0/11,9
10	9,2/9,9	9,0/9,9	8,8/9,9
8	7,0/7,9	6,7/7,8	6,5/7,9

**Результаты экспериментального исследования и их обсуждение.** Опытную правку проводили на 7-роликовой правильной машине ПАО "Северсталь" с горизонтальным расположением роликов при правке листов из стали 10 толщиной 16 мм и шириной 2400 мм [5].

Сравнение результатов опытного значения зазора 13,1 мм и расчетного значения 12,8 мм показало расхождение 4,5 %.

Сравнение опытных и расчетных данных показало, что результаты, полученные расчетным путем, качественно и количественно также хорошо согласуются с опытными данными, что свидетельствует об адекватности математической модели.

Знание настроечного зазора между роликами позволяет регулировать давление правки при деформации листов различной толщины и ширины.

**Заключение.** Рассмотрена регулировка настроечного зазора для РПМ двух типов: с параллельным и наклонным расположением роликов. Показано, что настроечный зазор для РПМ с параллельным расположением роликов зависит от толщины листа, износа по длине бочки ролика, шага роликов РПМ, радиуса кривизны листа при правке на РПМ.

При наклонном расположении роликов РПМ зазор под вторым и предпоследним роликами зависит от минимального зазора под вторым роликом, максимального зазора под предпоследним роликом, числа роликов в верхнем ряду.

Сравнение опытных и расчетных данных показало, что результаты, полученные расчетным путем, качественно и количественно хорошо согласуются с опытными данными, что свидетельствует об адекватности методики расчета настроечного зазора для РПМ.

Опытная правка проведена на 7-роликовой правильной машине ПАО "Северсталь" при правке листов из стали 10 толщиной 16 мм и шириной 2400 мм.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Королев А.А.** Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов. М.: Металлургия, 1985. 376 с.
2. **Шаталов Р.Л.** Расчет, проектирование и применение прокатного оборудования. Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. 236 с.

3. **Слоним А.З., Сонин А.Л.** Правка листового и сортового проката. М.: Металлургия, 1981. 232 с.

4. **Kaden V.** High performance leveler for hot and cold leveling of heavy plates // *Met. Plate and Tech.* 2007. No. 2. P. 92–94.

5. **Недорезов И.В.** Моделирование процессов правки проката на роликовых машинах. Екатеринбург: Аква-пресс, 2003. 256 с.

6. **Недорезов И.В., Орлов Б.Я., Титаренко В.И.** Роликовые машины для правки толстых листов // *Сталь.* 1999. № 9. С. 40–42.

7. **Максимов Е.А., Шаталов Р.Л., Васильев Ю.С.** Уточнение методики расчета параметров правки толстых листов на роликовой правильной машине // *Сталь.* 2017. № 1. С. 35–38.

8. **Недорезов И.В., Поляков А.П., Волегов Б.Я.** Методы определения остаточных напряжений в незакаленных рельсах // *Производство проката.* 2001. № 2. С. 11–16.

9. **Недорезов И.В.** Обзор промышленных процессов закалки рельсов и статочных напряжений в них // *Производство проката.* 2001. № 6. С. 13–18.

10. **Максимов Е.А., Шаталов Р.Л.** Повышение качества листов их строительных сталей путем правки на роликовой правильной машине // *Черные металлы.* 2018. № 6. С. 49–55.

11. **Sharma H.V.** Resent measures to improve quality of rails // *Technical Journal of Bhilai Steel.* 2008. No. 5. P. 21–23.

12. **Bramfitl B.** Advanced in-line head hardening of rails // *Proceeding of the international symposium // Baltimor.* 2015. No. 6. P. 23–29.

13. **Ghevet M.** Planeuse a ruoleaux imbriques et procede de mise en oeuvre telle planeuse // *Patent 9604683.* 2009. P. 1–5.

14. **Irastorsa I.** Modelisation of flatness evolution during coaling and leveling of plate as a for production desing // *Metec congress. Dusseldorf.* 2014. P. 106–111.

15. **Garber E.A., Bolobanova N.L., Trusov K.A.** Application of the Finite Element Method to Reveal the Causes of Loss of Planeness of Hot-Rolled Steel Sheets during Laser Cutting // *Russian Metallurgy (Metally).* 2018. Iss. 1. P. 90–94. DOI: 10.1134/S0036029518010056.

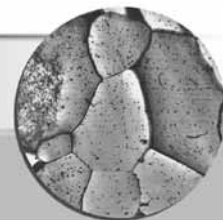
16. **Trusov K.A., Mishnev P.A., Garber E.A. et al.** Investigation of blank bow defect after roller leveler by finite element analysis // *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1063,* 2018. 012192.

17. **Utrata D.** Evaluation of web cracking tendencies in rail via barious methods // *20 Proceedings of the international symposium — Rail steels for the 21 cenrary.* Baltimor. 2014. P. 131–135.

18. **Hein Marten.** Antreibsleistungbeim richten voncrobblechen // *Bander-Bleche-Rohre.* 2013. 10. P. 23–26.

*Евгений Александрович Максимов, канд. техн. наук,  
maksimov50@mail.ru;*

*Роман Львович Шаталов, д-р техн. наук;  
Евгений Петрович Устиновский, канд. техн. наук*



УДК 669.715.017:620.18:622.24.05

DOI: 10.36652/1684-1107-2020-18-7-319-327

О.В. Швецов, С.Ю. Кондратьев, Б.А. Шемякинский  
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого)

## Влияние защитных покрытий на работоспособность алюминиевых сплавов в условиях нефтедобычи

*Изучено влияние защитных покрытий на износостойкость и коррозионную стойкость алюминиевого сплава Д16, используемого для изготовления бурильных труб. Проанализирован характер поврежденных бурильных труб из алюминиевых сплавов в процессе эксплуатации. Исследованы микроструктура покрытий, электрохимический потенциал и скорость коррозии алюминиевого сплава Д16 с покрытием различного состава и без него, а также выполнен сравнительный анализ адгезии и износостойкости покрытий. Показано, что трубная заготовка из сплава Д16 с покрытием на основе карбида вольфрама обладает наиболее высоким комплексом служебных свойств и ее можно применять для эффективной защиты поверхности алюминиевых бурильных труб при эксплуатации.*

**Ключевые слова:** алюминиевый сплав Д16; защитные покрытия; электрохимический потенциал; адгезия; износостойкость; бурильные трубы.

*The effect of protective coatings on the wear resistance and corrosion resistance of the 2024 aluminium alloy used for the oil drill pipes producing is studied. The nature of the drill pipes damage made of aluminium alloys during operation is analyzed. The microstructure of the coatings, the electrochemical potential and corrosion rate of the 2024 aluminium alloy with and without coatings of various compositions are studied, and comparative analysis of the adhesion and wear resistance of coatings is performed. It is shown that tube billet made of 2024 alloy with coating based on tungsten carbide has the highest range of service properties and can be used to effectively protect the surface of aluminium drill pipes during operation.*

**Keywords:** 2024 aluminium alloy; protective coatings; electrochemical potential; adhesion; wear resistance; drill pipes.

Развитие нефтегазодобывающей промышленности сопровождается постоянным усложнением условий бурения скважин: коррозионно-активные среды, твердые породы, глубокое залегание сырья, наклонно-горизонтальное бурение [1–5]. Это требует использования новых материалов для изготовления бурильных труб и обоснованного их выбора для конкретных условий применения. Исследования показали преимущества и перспективность использования алюминиевых сплавов в качестве материала бурильных труб при разработке нефтяных месторождений по сравнению со сталями [6–10]. В настоящее время проводят полевые испытания райзеров, обсадных колон и насосно-компрессорных труб, изготовленных из алюминиевых сплавов.

Обладая значительными преимуществами, в том числе по коррозионной стойкости [11, 12], алюминиевые бурильные трубы уступают стальным по износостойкости. Для повышения износостойкости алюминиевых труб применяют различные способы: термическая обработка, холодная деформация, поверхностное упрочнение и др. [13–17]. Однако наиболее экономичным представляется нанесение защитного покрытия на металл трубы. Такое покрытие на алюминиевых сплавах должно обладать необходимой адгезией с основным металлом и сплошностью, а технология его нанесения не должна изменять служебные свойства подложки. Поскольку в литературе практически отсутствуют сведения о влиянии защитных покрытий на свойства алюми-

вых бурильных труб, такое исследование является актуальным.

*Цель работы* — экспериментальная оценка влияния различных защитных покрытий на эксплуатационные свойства алюминиевых бурильных труб.

**Методика проведения исследований.** Для исследований использовали заготовки бурильных труб диаметрами 147 и 126 мм из алюминиевого сплава Д16 системы Al—Cu—Mg в состоянии поставки (закалка и естественное старение). Химический анализ металла трубы определяли методом микрорентгеноспектрального анализа на установке "Самбах" (табл. 1). Химический состав материала труб соответствует стандартному алюминиевому сплаву Д16 (ГОСТ 4784—2019). Исключением является повышенное содержание кремния в заготовках, на которые наносили покрытие G4 (см. табл. 1).

Для нанесения покрытий использовали различные составы, полученные от трех разных производителей. Покрытия P и K наносили на трубную заготовку алюминиевого сплава Д16 в состоянии после закалки и естественного старения, а покрытие G — на заготовку после отжига. Все покрытия наносили на алюминиевую трубу высокоскоростным газопламенным напылением.

Металлографический анализ продольных и поперечных шлифов сплава проводили на оптическом микроскопе Reichert-Jung MeF3A при увеличениях 100...500. Химический состав покрытий определяли на автоэмиссионном растровом электронном микроскопе SUPRA 55/55VP. Изготовление и подготовку метал-

лографических шлифов выполняли на оборудовании фирмы Buehler согласно стандарту ASTM E 3—95.

Микротвердость измеряли по методу Виккерса на приборе Reichert-Jung Micro-Duromat 4000E в соответствии с процедурой ASTM E 92.

Электродный потенциал металла определяли в растворе 5%-ного хлористого натрия, используя по три образца на каждый вариант покрытия. Измерение потенциала проводили с помощью высокоомного вольтметра по стандартному хлорсеребряному электроду сравнения, имеющему собственный потенциал относительно нормального водородного электрода —0,200 В. Продолжительность эксперимента составляла 120 ч. Электродные потенциалы образцов измеряли ежедневно в течение 60 мин.

Скорость коррозии пары металл—покрытие по потерям массы определяли согласно требованиям стандарта ASTM G71—81 и рассчитывали по формуле в соответствии с ГОСТ 9.908—85:

$$v_{\text{кор}} = (m_k - m_0)/St,$$

где  $v_{\text{кор}}$  — скорость коррозии, г/(м<sup>2</sup> · ч);  $m_k$  — масса образца после испытаний, г;  $m_0$  — масса образца до испытаний, г;  $S$  — площадь поверхности образца, м<sup>2</sup>;  $t$  — продолжительность испытаний, ч.

Механические свойства сплавов с покрытием определяли при испытаниях на трехточечный изгиб на установке, показанной на рис. 1.

Напряжения при испытаниях вычисляли по методу конечных элементов с помощью па-

### 1. Фактический химический состав образцов сплава Д16 с различными покрытиями

Марка сплава	Покрытие	Содержание основных химических элементов, % мас. (Al — основа)							
		Mg	Zn	Mn	Cu	Cr	Ti	Fe	Si
Д16 (Base P)	P1	1,59	0,24	0,49	4,39	0,02	0,04	0,23	0,20
	P3	1,50	0,05	0,67	4,89	0,01	0,04	0,44	0,24
Д16 (Base K)	K1	1,50	0,15	0,78	4,79	0,03	0,06	0,08	0,06
	K2	1,57	0,16	0,70	4,75	0,03	0,06	0,08	0,03
	K3	1,57	0,12	0,75	4,68	0,01	0,05	0,06	0,07
Д16 (Base G)	G1	1,26	0,14	0,64	4,71	0,04	0,09	0,14	0,08
	G2	1,25	0,13	0,68	4,20	0,03	0,09	0,15	0,05
	G4	1,32	0,14	0,73	4,81	0,03	0,03	0,05	1,99



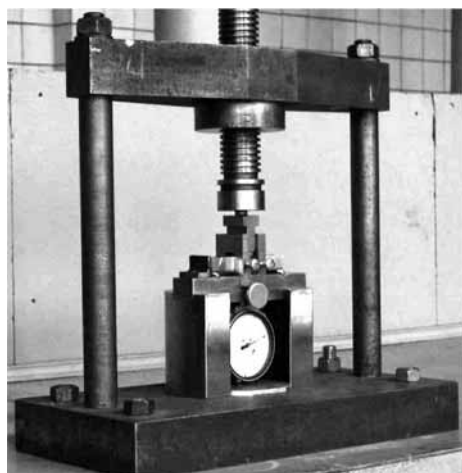


Рис. 1. Установка для определения механических свойств покрытий

кета Cosmos Works (с учетом геометрии каждого образца).

Испытание на износостойкость покрытий проводили на стенде, эскиз которого представлен на рис. 2. Стенд оборудован тремя двигателями, позволяющими одновременно: вращать вал с *испытуемым телом* (ИТ) с частотой вращения до  $150 \text{ мин}^{-1}$ ; вращать *контртело* (КТ) посредством зубчатой шестерни и цепной передачи с частотой вращения до  $50 \text{ мин}^{-1}$ ; перемещать ИТ относительно КТ со скоростью до  $5 \text{ м/ч}$ . ИТ прижимается к КТ специальным устройством с силой до  $3000 \text{ Н}$ . Вместимость бака для промывочной жидкости  $250 \text{ л}$ . Жидкость подается в место контакта ИТ с КТ насосом, затем самотеком возвращается в бак.

Контроль измеряемых параметров (момент трения, сила прижатия и частота вращения вала), а также управление двигателями, обеспечивающими три вида движения (вращение и продольное перемещение образца, вращение КТ), осуществляли пультом управления. Данные, поступающие с датчиков, обрабатываются с помощью программного обеспечения Dacell TMS Ver 1.1 и сохраняются в файлах в виде таблиц и графиков.

Условия испытаний на износостойкость покрытий: сила прижатия ИТ к КТ  $1000 \text{ Н}$ ; частота вращения ИТ  $100 \text{ мин}^{-1}$ ;

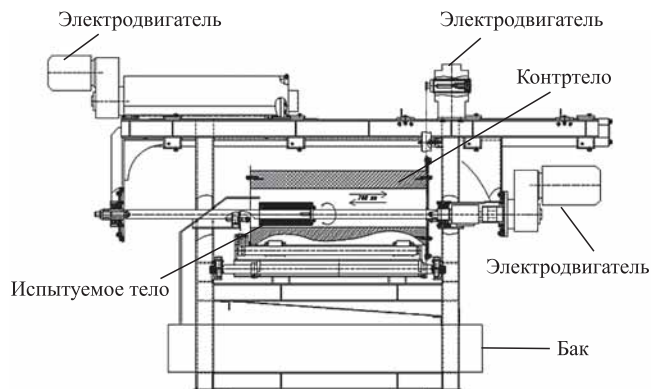


Рис. 2. Схема стенда для испытаний износостойкости покрытий

скорость перемещения ИТ вдоль оси вала  $3 \text{ м/ч}$ ; частота вращения КТ  $0,1 \text{ мин}^{-1}$ ; промывочная жидкость — вода.

**Результаты исследований и их обсуждение.** На рис. 3 и в табл. 2 приведены микроструктуры и значения микротвердости сплава с различными покрытиями. Структура сплава состоит из зерен  $\alpha$ -твердого раствора и включений интерметаллидов. В закаленном и состаренном со-

**2. Микротвердость исследованных образцов алюминиевого сплава Д16 с различными покрытиями**

Покрытие	Микротвердость HV, Па
P1	1400...1550
P3	1350...1450
K1	1350...1500
K2	1400...1550
K3	1400...1500
G1	750...850
G2	730...780
G4	710...770

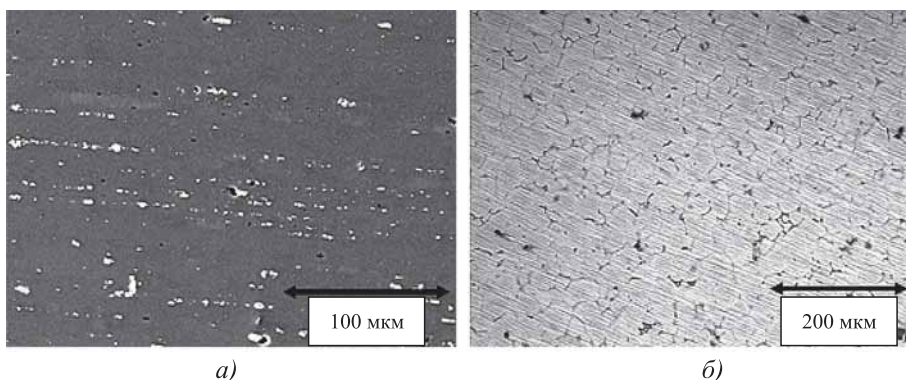


Рис. 3. Микроструктуры сплава Д16 после закалки и естественного старения с покрытием P (а) и после отжига с покрытием G (б): а — продольное сечение; б — поперечное сечение

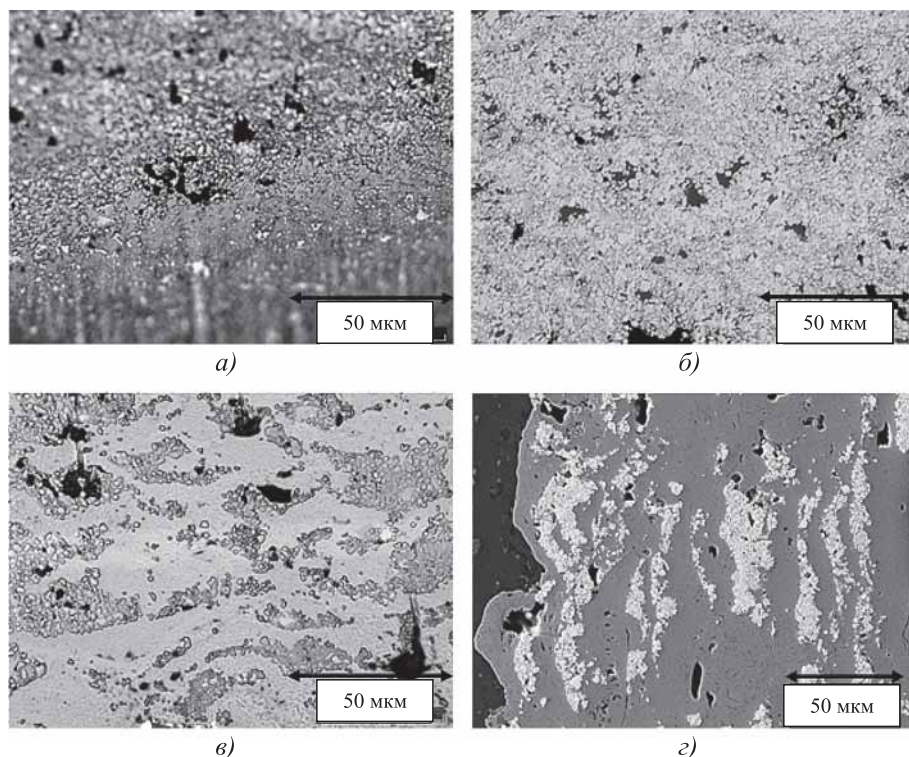


Рис. 4. Микроструктуры покрытий P1 (а, б) и P3 (в, г):

а, в — оптический микроскоп; б, г — электронный микроскоп

стоянии анизотропия деформированного сплава проявляется в большей степени. Интерметаллидные фазы более равномерно распределены по толщине и длине отожженных трубных заготовок. Соответственно, микротвердость отожженного сплава с покрытиями G значительно ниже по сравнению с закаленным и состаренным сплавом с покрытиями P и K.

На рис. 4 показаны микроструктуры покрытий P1 и P3.

Микроструктура покрытия P1 толщиной 120 мкм однородна по всей поверхности образца с незначительным количеством пор, равномерно распределенных по сечению и длине покрытия; пористость составляет 1,94 %. Анализ химического состава покрытия P1 показал, что оно полностью состоит из карбида вольфрама WC, что подтверждается его высокой микротвердостью 11 300 HV.

Микроструктура покрытия P3 содержит две структурные составляющие: ~50 % об. WC микротвердостью 12 000 HV и ~50 % об. связки системы Ni—Cr—Si микротвердостью 8700 HV. Пористость этого покрытия выше по сравнению с P1 и составляет 3,25 %, а его толщина — 160 мкм.

Микроструктуры покрытий K1, K2 и K3 представлены на рис. 5. Структура покрытия K1 однородная, пористость равна 0,038 %, толщина — 80 мкм; покрытие полностью состоит из карбида вольфрама микротвердостью 12 300 HV.

Микроструктура покрытия K2 толщиной 160 мкм состоит из двух составляющих: ~53 % об. WC микротвердостью 12 000 HV и ~47 % об. связки системы Ni—Cr—Si микротвердостью 8700 HV.

Пористость покрытия увеличивается от 0,032 % в центральной части до 0,21 % на поверхности.

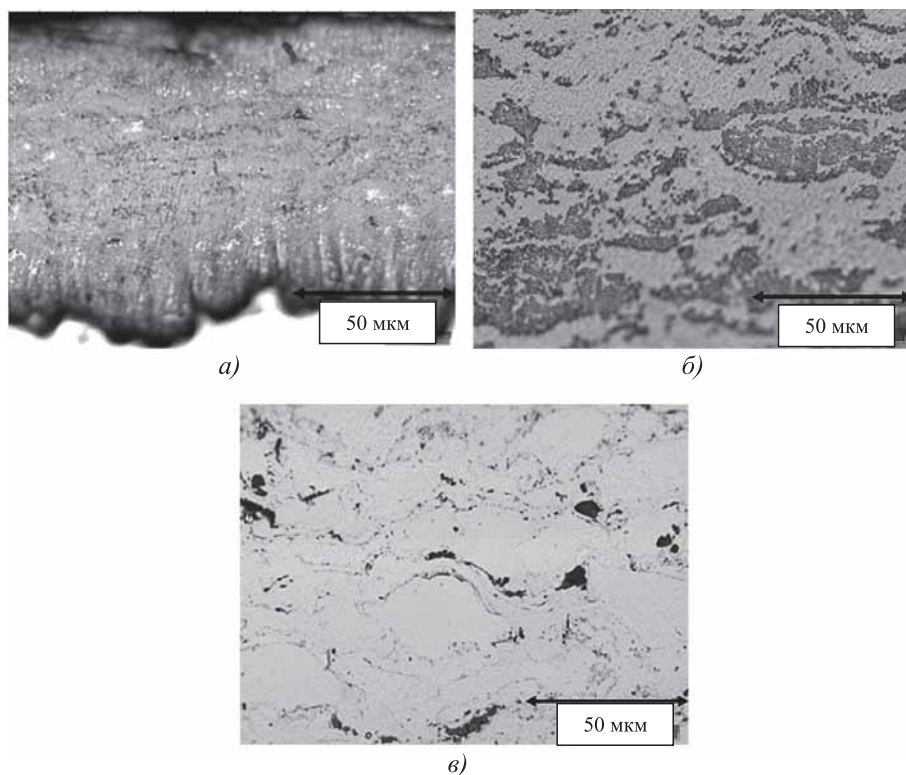
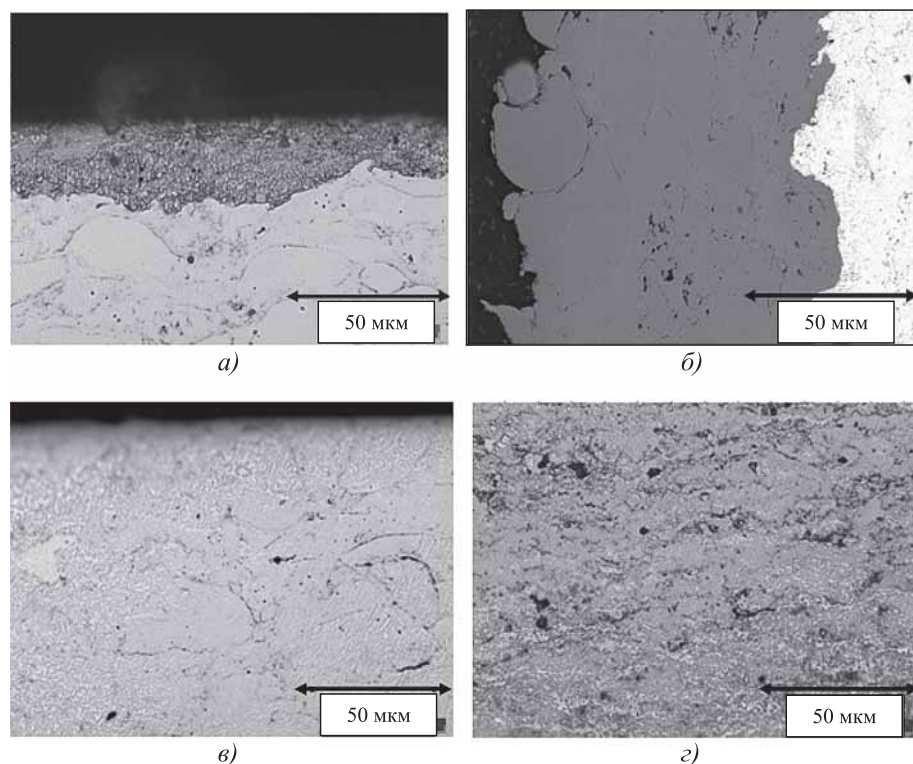


Рис. 5. Микроструктуры покрытий K1 (а), K2 (б) и K3 (в)



стью 11 600 HV и внутренний — из смеси системы Ni—Cr—Mo микротвердостью 5500 HV. Средняя пористость покрытия равна 0,54 % и сосредоточена в основном во внутреннем слое. Общая толщина покрытия составляет 120 мкм, причем толщина наружного слоя — 25...30 мкм, а его сплошность низкая — наблюдаются участки без покрытия.

Микроструктура покрытия G2 толщиной 140 мкм однородная и состоит из смеси состава Fe—Cr—Ni микротвердостью 7900 HV и пористостью 0,083 %.

Микроструктура покрытия G4 толщиной 326 мкм также относительно однородная и состоит из карбида вольфрама микротвердостью 12 900 HV, пористость ее равна 0,76 %.

**Рис. 6. Микроструктуры покрытий G1 (а, б), G2 (в) и G4 (г):**

а, в, г — оптический микроскоп; б — электронный микроскоп

Микроструктура покрытия K3 состоит в основном из смеси системы Ni—Cr—Si микротвердостью 6300 HV и небольшого количества (~3,98 % об.) оксида  $Al_2O_3$ , который образует конгломераты. Пористость покрытия K3 составляет 4,45 %, а его толщина — 170 мкм.

Микроструктуры покрытий G1, G2 и G4 приведены на рис. 6.

Микроструктура покрытия G1 состоит из двух слоев: наружный — толщиной до 30 мкм состоит из карбида вольфрама микротвердо-

Результаты металлографического анализа покрытий сведены в табл. 3.

Таким образом, из восьми покрытий лучшим по комплексу исследованных характеристик является покрытие K1. Покрытия P1, K2, G2 и G4 также имеют удовлетворительные характеристики. Покрытие G1 из-за невысокой сплошности наружного (твердого) слоя и относительно низкой твердости внутреннего слоя не является перспективным для практического использования.

### 3. Характеристики исследованных покрытий

Покрытие	Состав покрытия	Структурная однородность	Пористость, %	Микротвердость HV, Па
P1	WC	+	1,94	11 300
P3	WC Ni—Cr—Si	—	3,25	12 000 8700
K1	WC	+	0,04	12 300
K2	WC Ni—Cr—Si	—	0,03	12 000 8700
K3	Ni—Cr—Si	—	4,45	6300
G1	WC Ni—Cr—Ni—Mo	+	0,54	11 600 5500
G2	Fe—Cr—Ni	+	0,08	7900
G4	WC	+	0,76	12 900

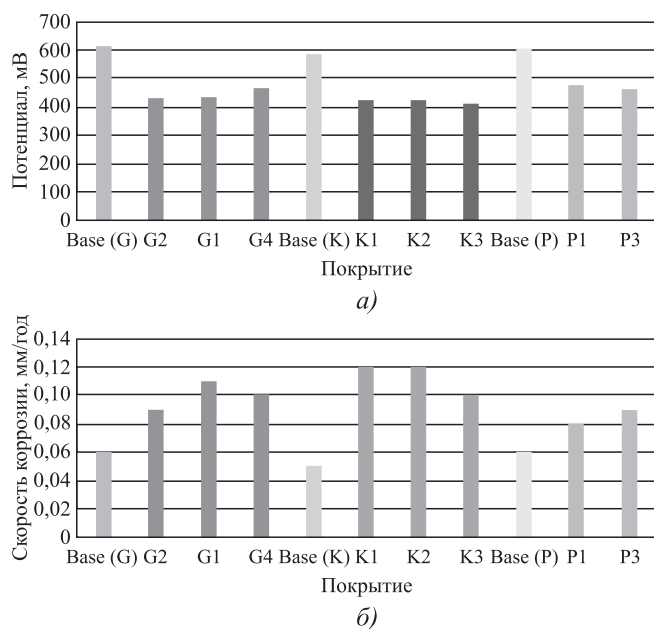


Рис. 7. Электродный потенциал (а) и скорость коррозии (б) алюминиевого сплава Д16 (см. табл. 1) без покрытия и с различными покрытиями

Результаты измерения электродных потенциалов сплава Д16 без покрытия и с различными покрытиями показаны на рис. 7, а. Значения электрохимического потенциала для всех сплавов Д16 без покрытия составляют 580...612 мВ, что более чем на 100 мВ отрицательнее, чем потенциалы сплава Д16 с покрытиями. Следовательно, в месте контакта покрытия с алюминиевым сплавом коррозионному растворению будет подвергаться алюминиевый сплав. Поэтому при определении скорости контактной коррозии образцов по потере массы в расчет принимали только площадь поверхности алюминиевого образца, не закрытую износостойким покрытием.

Результаты испытаний на контактную коррозию сплава Д16 без покрытия и с различными покрытиями представлены на рис. 7, б. Видно, что износостойкие покрытия в месте контакта с основным металлом способствуют некоторому усилению скорости коррозии сплава Д16 от 0,06 до 0,08...0,12 мм/год. Из этого следует, что в месте контакта с покрытием на алюминиевом сплаве после 8–12 лет эксплуатации может образоваться заглабление в виде канавки глубиной до 1 мм.

В табл. 4 приведены результаты испытаний на трехточечный изгиб сплава Д16 с покрытиями. Максимальный прогиб до образования трещины в покрытии зафиксирован на образцах сплава с покрытиями G1 и G2. Рассчитан-

4. Результаты испытаний на трехточечный изгиб сплава Д16 с различными покрытиями

Покрытие	Максимальные напряжения в зоне разрушения покрытия, МПа
P1	1000
P3	800
G1	1040
G2	
G4	1000
K1	1020
K2	980
K3	1020

ные максимальные напряжения в зоне их разрушения составляют 1040 МПа. Значения напряжения разрушения покрытий P1, G4, K1, K3 имеют средний уровень, а покрытий P3 и K2 — наиболее низкий.

Результаты испытаний на износ сплава Д16 с различными покрытиями сведены в табл. 5,

5. Результаты испытаний на износостойкость сплава Д16 с различными покрытиями

Покрытие	Маркировка	Потеря массы, г	Продолжительность испытаний, мин	
P1	P1.1	2,4	240	
	P1.2	0	480	
	P1.3	0,3		
P3	P3.1	6,2	120	
	P3.2	8,7	480	
	P3.3	6,9		
G1	G1.1	0,2	30	
	G1.2	0,7		
G2	G2.1	12,5		480
	G2.2	19,5		
G4	G4.1	0	480	
	G4.2			
	G4.3			
K1	K1.1	0,1	480	
	K1.2	0		
	K1.3			
K2	K2.1	31,5	30	
	K2.2	10,6		
	K2.3	9,8		
K3	K3.1	2,2	480	
	K3.2			
	K3.3			

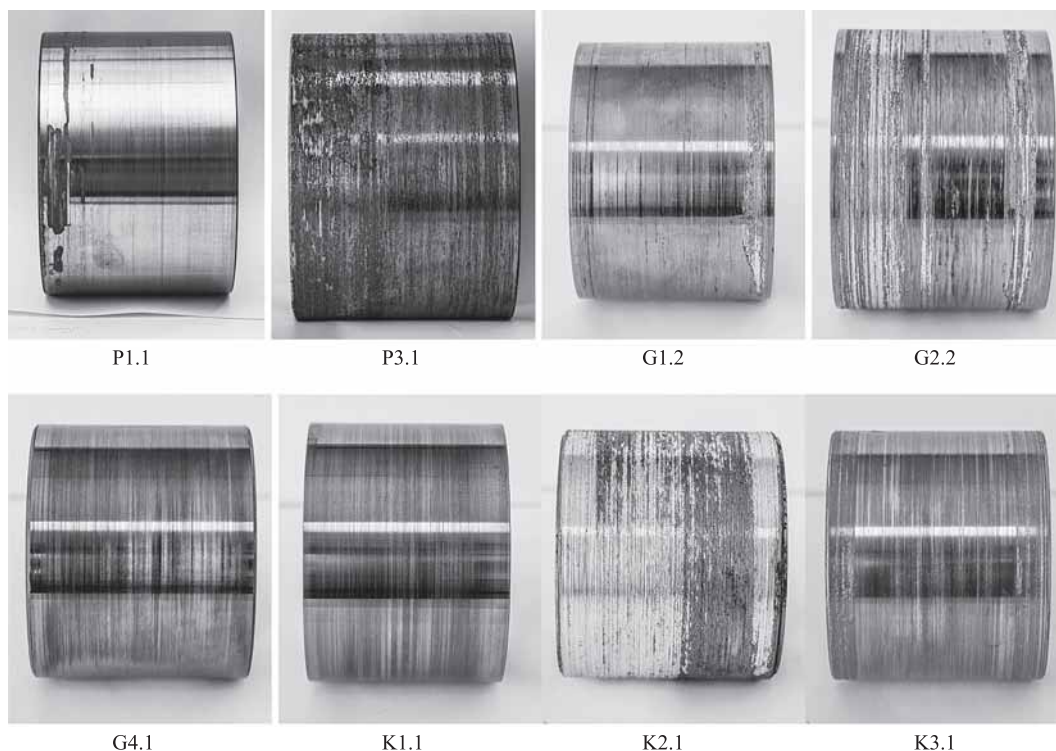


Рис. 8. Образцы сплава Д16 с различными покрытиями после испытаний на износостойкость. Маркировка образцов по табл. 5.


внешний вид образцов после испытаний показан на рис. 8. Наиболее износостойкими являются покрытия P1, K1 и G4.


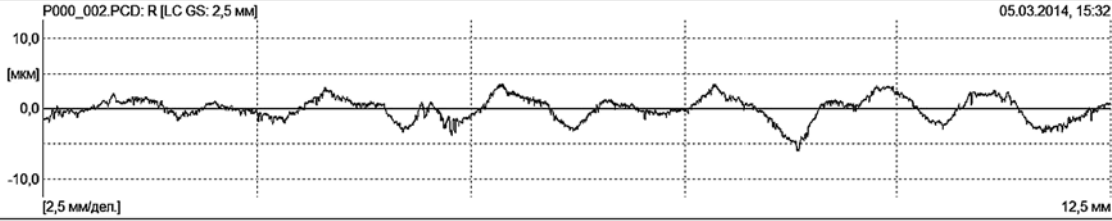
Для сравнительного описания характера изношенных поверхностей покрытий проведена

оценка шероховатости с помощью профилометра MarSurf1. Результаты замеров параметра шероховатости  $Ra$  приведены в табл. 6.

Минимальный параметр шероховатости  $Ra$  имеют образцы сплава с покрытием G4.

6. Оценка шероховатости поверхности покрытий на сплаве Д16 после испытаний на износ

Покрытие	Профилограмма	$Ra$ , МКМ											
P1	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="text-align: center;">  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Mahr GmbH</p> </div> <div style="text-align: right;"> <p>PS1 Explorer</p> </div> </div> <div style="margin-top: 5px;"> <p>Объект: Плакарт1                      Номер:                      Комментарий:</p> </div> <div style="margin-top: 5px; font-size: small;"> <p>Lt: 17,50 мм                      Ls: 8,0 мкм                      V/B: 350 мкм                      Vt: 0,50 мм/с                      Отсчеты: 11200                      Щуп: PHT 350</p> </div> <div style="margin-top: 5px;"> <p>P000_001.PCD: R [LC GS: 2,5 мм] <span style="float: right;">05.03.2014, 15:30</span></p> </div> <div style="margin-top: 5px; font-size: x-small;"> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;">Ra</td> <td style="width: 30%;">3,384 мкм</td> <td style="width: 30%;">Rz</td> <td style="width: 10%;">17,10 мкм</td> <td style="width: 10%;">Rmax</td> <td style="width: 10%;">29,90 мкм</td> </tr> <tr> <td>RSm</td> <td>1618 мкм</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table> </div>	Ra	3,384 мкм	Rz	17,10 мкм	Rmax	29,90 мкм	RSm	1618 мкм				
Ra	3,384 мкм	Rz	17,10 мкм	Rmax	29,90 мкм								
RSm	1618 мкм												

Покрытие	Профилограмма		Ra, мкм										
K1			1,3										
	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>Объект: Kermetico1 Номер: Комментарий:</p> </div> <div> <p>PS1 Explorer</p> <p>Lt: 17,50 мм Ls: 8,0 мкм Vb: 350 мкм Vt: 0,50 мм/с Отсчеты: 11200 Щуп: PHT 350</p> </div> </div> <div style="text-align: center;"> <p>P000_002.PCD: R [LC GS: 2,5 мм] 05.03.2014, 15:32</p>  <p>12,5 мм</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Ra</td> <td>1,268 мкм</td> <td>Rz</td> <td>6,56 мкм</td> <td>Rmax</td> <td>9,41 мкм</td> </tr> <tr> <td>RSm</td> <td>1177 мкм</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table> </div>			Ra	1,268 мкм	Rz	6,56 мкм	Rmax	9,41 мкм	RSm	1177 мкм		
Ra	1,268 мкм	Rz	6,56 мкм	Rmax	9,41 мкм								
RSm	1177 мкм												

зависит от состава и структуры покрытия. Если по влиянию на коррозионные и механические свойства сплава все покрытия сопоставимы, то влияние их на износостойкость значительно различается.

Установлено, что наиболее положительное влияние на комплекс служебных свойств сплава Д16 для условий эксплуатации бурильных труб в нефтедобыче оказывает покрытие G4 (WC), в наибольшей степени повышающее износостойкость материала. Наиболее низкие показатели имеет покрытие K2 (WC + Ni—Cr—Si).

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Файн Г.М., Макаров Г.С.** Особенности производства и применения бурильных труб из сплавов алюминия в России // *Технология легких сплавов*. 2002. № 1. С. 16—20.
2. **Басович В.С., Буяновский И.Н., Петункин И.В.** Перспективы применения алюминиевых бурильных труб при бурении горизонтальных скважин большой протяженности // *Бурение и нефть*. 2015. № 6. С. 81—85.
3. **Тан М., Gan L.** Equilibrium equations for nonlinear buckling analysis of drill-strings in 3D curved well-bores // *Science in China Series E: Technological Sciences*. 2009. Vol. 52. No. 3. P. 590—595.
4. **Фукс М.Д., Зеленин Ю.В., Кондратьев С.Ю.** Исследование качества металла толстостенных труб из коррозионно-стойких сталей // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2012. № 2. С. 36—38.
5. **Шакирова А.И., Назарова М.Н., Исмаков Р.А. и др.** О перспективных направлениях совершенствования технологий изготовления алюминиевых бурильных труб для работы в условиях Арктики // *Материалы для технических устройств и конструкций, применяемых в Арктике: сб. докл. конф. М.: ФГУП ВИАМ, 2015. С. 1—20.*
6. **Пути развития и совершенствования высокопрочных сплавов системы Al—Zn—Mg—Cu / В.В. Захаров, В.И. Елагин, Т.Д. Ростова, М.В. Самарина // *Технология легких сплавов*. 2008. № 4. С. 7—13.**
7. **Исследование** структуры и свойств бурильных труб из сплава Д16Т после эксплуатации в условиях нефтедобычи / С.С. Колесов, С.Ю. Кондратьев, В.В. Чижиков, О.В. Швецов // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2011. № 4. С. 39—43.
8. **HZ25-4 ERD challenging drilling project-new strategy and new technology implementation are the keys to improved drilling performance / L.J. Hong, P.G. Scaruffi, T.W. Brewster, S.M. Balka // *SPE ATCE*. 19—22 September 2010. Paper SPE 134949.**
9. **Кондратьев С.Ю., Швецов О.В.** Влияние высокотемпературных нагревов на структуру и свойства алюминиевых сплавов при изготовлении бурильных труб // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2013. № 4 (694). С. 24—30.
10. **Швецов О.В., Кондратьев С.Ю.** Влияние горячей посадки замкового соединения на структуру и свойства металла бурильных труб из алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1 // *Технология машиностроения*. 2012. № 5. С. 31—36.
11. **Кондратьев С.Ю., Швецов О.В., Альхименко А.А.** Изменение механических свойств алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1 в коррозионно-активной среде нефтяных скважин // *Научно-технические ведомости СПбПУ*. 2014. № 2 (195). С. 93—99.
12. **Швецов О.В., Альхименко А.А., Кондратьев С.Ю.** Коррозионные повреждения бурильных труб из алюминиевых сплавов Д16 и 1953 при эксплуатации в условиях нефтедобычи // *Научно-технические ведомости СПбПУ*. 2014. № 3 (202). С. 180—191.
13. **Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А.** *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: МИСиС, 1999. 413 с.*
14. **Фридляндер И.Н.** Закономерности изменения свойств алюминиевых сплавов при старении // *МиТОМ*. 2003. № 9. С. 8—11.
15. **Горынин В., Кондратьев С., Попов В.** Лазерное модифицирование трибологических свойств сталей и цветных сплавов // *Фотоника*. 2010. № 3 (21). С. 26—33.
16. **Кондратьев С.Ю., Горынин В.И., Попов В.О.** Оптимизация параметров поверхностно-упрочненного слоя при лазерной закалке деталей // *Сварочное производство*. 2011. № 3. С. 11—15.
17. **Кондратьев С.Ю.** *Механические свойства металлов: учебное пособие. СПб.: Изд-во СПбПУ, 2011. 128 с.*

*Олег Викторович Швецов, канд. техн. наук;  
Сергей Юрьевич Кондратьев, д-р техн. наук,  
petroprom2013@yandex.ru;  
Борис Александрович Шемякинский*

Е.А. Морозова<sup>1</sup>, А.П. Морозов<sup>2</sup>, В.С. Муратов<sup>1</sup><sup>(1)</sup>Самарский государственный технический университет, <sup>(2)</sup>АО "Гипровостокнефть", г. Самара)

## Влияние термической и поверхностной пластической обработок углеродистой стали на чувствительность к концентраторам напряжений при циклическом нагружении

*Исследовано влияние термической и пневмодробеструйной обработок на сопротивление усталости стали 20. Установлено, что термическая обработка перед пневмодробеструйной обработкой стальными шариками обеспечивает эффективное снижение чувствительности к концентраторам напряжений и повышение сопротивления усталости стали.*

**Ключевые слова:** термическая обработка; пневмодробеструйная обработка; концентратор напряжений; микротвердость; сопротивление усталости.

*Effect of heat treatment and air shot-blasting on 20 steel fatigue strength is studied. It is established that heat treatment before air steel balls shot-blasting leads effective decrease in sensitivity to stress concentrator and increase in steel fatigue strength.*

**Keywords:** heat treatment; air shot-blasting; stress concentrator; microhardness; fatigue strength.

Известно [1–3], что при переменных во времени напряжениях наличие концентратора напряжений на образце или детали значительно снижает предел выносливости материала. Многократное изменение повышенных напряжений в зоне концентратора приводит к ускоренному образованию и дальнейшему развитию трещины с последующим усталостным разрушением образца. Однако вопросы чувствительности к наличию концентратора напряжений в зависимости от вида и режимов обработки материала, его сформированной структуры исследованы недостаточно, хотя наличие такой зависимости отмечено в ряде работ [4–8], в том числе и для конструкционных углеродистых сталей.

В настоящей работе исследовано влияние наличия концентратора напряжений на закономерности развития усталостной повреждаемости образцов из стали 20 с различными вариантами термической обработки и применением поверхностного пластического упрочнения.

**Методика проведения исследований.** Химический состав исследуемой стали 20, % мас: 0,22 С; 0,31 Si; 0,42 Mn; 0,11 Ni; 0,035 S; 0,032 P; 0,09 Cr; 0,12 Cu.

Для определения предела выносливости  $\sigma_{-1}$  стали из прокатанного прутка вырезали образцы диаметром 12 мм с галтелью радиусом  $r$

от 0,5 до 5 мм, которая является концентратором напряжений (рис. 1).

Также изготавливали образцы для стандартных механических испытаний на растяжение и ударную вязкость. Часть образцов подвергали двум вариантам термической обработки: вариант № 1 — нормализация (температура нагрева 900...920 °С, охлаждение на воздухе); вариант № 2 — закалка (температура нагрева 900...920 °С, охлаждение в воде) и отпуск (температура 550...570 °С, время выдержки 1,5 ч).

Часть образцов для усталостных испытаний в состоянии поставки (без дополнительной термической обработки (вариант № 3) и после нее (варианты № 1 и № 2) были поверхностно упрочнены с помощью *пневмодробеструйной обработки* (ПДО) в течение 10 мин. При этом давление воздуха составляло 0,28 МПа, а диаметр стальной дроби — 1,5...2,5 мм. Усталостные испытания проводили на машине МУИ-600, при чистом изгибе и симметричном цикле нагружения.

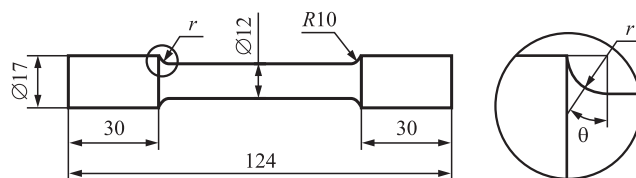


Рис. 1. Исследуемый образец для определения предела выносливости





Рис. 2. Схема измерения микротвердости

Влияние радиуса галтели на сопротивление усталости образцов из стали 20 анализировали также по данным распределения микротвердости. Микротвердость по Кнупу измеряли на микротвердомере ММ6 фирмы Leitz. Схема измерения микротвердости на образце показана на рис. 2.

Измерение осуществляли в осевом направлении, двигаясь от зоны разрушения. Зону разрушения — зону от поверхности излома до окончания галтели — отрезали по сечению окончания галтели, после чего на отделенном фрагменте измеряли микротвердость. Первый замер микротвердости выполняли примерно на расстоянии 250...400 мкм от поверхности излома, так как на меньшем расстоянии поверхность образца имеет коническую форму и измерить отпечаток не представляется возможным.

В зоне I — зоне устойчивого упрочнения (протяженностью 0,80...3,86 мм в зависимости от варианта обработки) — шаг измерений составлял 70...100 мкм; в зоне II — зоне снижения микротвердости до уровня основной зоны (протяженностью 1,10...2,20 мм) — 120...150 мкм. В основной зоне III замеры осуществляли через 0,5...1 мм.

**Результаты исследований и их обсуждение.** При визуальном осмотре, а также при исследовании с помощью микроскопа изломов образцов (с дополнительной термической обработкой и без нее, упрочненных и неупрочненных ПДО) было установлено, что зарождение и развитие усталостной трещины происходило не в наименьшем сечении (переход поверхности малого цилиндра в галтель), а в сечении, расположенном под некоторым углом  $\theta$  к наименьшему сечению (см. рис. 1). Внешний вид образовавшихся усталостных трещин показан на рис. 3.

В работе [9] представлены результаты исследований по определению предела вынос-

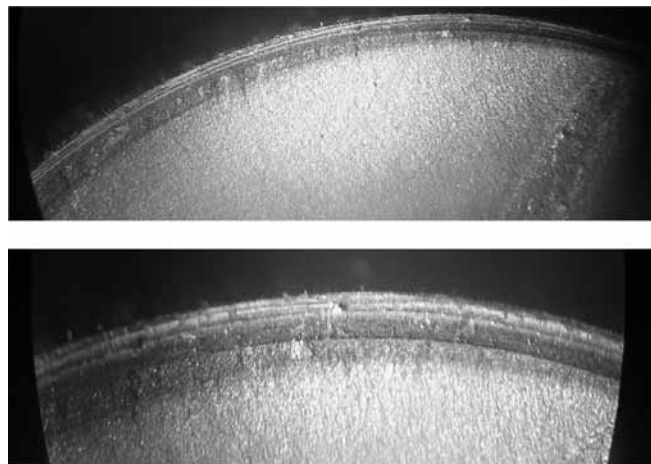


Рис. 3. Зарождение усталостных трещин

ливости неупрочненных и упрочненных с помощью ПДО образцов из стали 20 без дополнительной термической обработки (вариант № 3). Было выявлено, что с увеличением радиуса галтели  $r$  (см. рис. 1) предел выносливости образцов с ПДО и без нее возрастает. Выполненные методом конечно-элементного моделирования с использованием расчетного комплекса NASTRAN/PATRAN расчеты [9] также показали, что положение точки на поверхности галтельного перехода с максимальными напряжениями зависит от радиуса галтели  $r$ . При увеличении радиуса  $r$  точка смещается к наименьшему сечению образца с галтелью и, таким образом, положение опасного сечения детали с галтельным переходом, определяемое углом  $\theta$  (см. рис. 1), зависит от радиуса галтели. Данные расчеты подтверждают особенности расположения трещин, выявленные на изломе.

В табл. 1 и 2 приведены результаты определения механических свойств образцов, обработанных по исследуемым режимам и имеющих (в случае усталостных испытаний) галтели разного радиуса  $r$ . Для оценки чувствительности материала к наличию концентратора

**1. Механические свойства стали 20 при различных вариантах обработки**

Номер варианта обработки	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_B$	$\delta$	$\varphi$	$K_{CSU}$ , кДж/м <sup>2</sup>
	МПа		%		
1	355	520	25,4	55,4	590
2	430	595	21,3	50,1	570
3	325	490	23,1	52,2	520

**2. Результаты определения предела выносливости  $\sigma_{-1}$  и коэффициента концентрации напряжений  $K$**

Номер варианта обработки	Радиус галтели $r$ , мм									
	10		5		3		1		0,5	
	$\sigma_{-1}$ , МПа	$K$	$\sigma_{-1}$ , МПа	$K$	$\sigma_{-1}$ , МПа	$K$	$\sigma_{-1}$ , МПа	$K$	$\sigma_{-1}$ , МПа	$K$
1	253	1,0	243	1,04	216	1,17	179	1,41	152	1,66
2	265		257	1,03	233	1,14	192	1,38	172	1,54
3	240		225	1,06	185	1,30	163	1,48	128	1,88
1 + ПДО	282		276	1,02	254	1,11	210	1,34	189	1,49
2 + ПДО	296		290	1,02	272	1,09	245	1,21	211	1,4
3 + ПДО	275		263	1,04	225	1,22	188	1,47	173	1,59
Примечание. Данные по вариантам № 3 и № 3 + ПДО соответствуют результатам, представленным в [9].										

напряжений использовали коэффициент концентрации напряжений  $K$ , который определяли как отношение предела выносливости стандартного образца с обеими галтелями радиуса 10 мм к пределу выносливости образца с одной из галтелей радиусами 5; 3, 1 и 0,5 мм (см. рис. 1).

Из данных табл. 1 видно, что дополнительная термическая обработка позволяет улучшать характеристики прочности и ударной вязкости стали, а в случае варианта обработки № 1 — и показатели ее пластичности.

Как следует из представленных в табл. 2 данных, наилучшая сопротивляемость усталости и наименьшая чувствительность к концентратору напряжений обеспечиваются вариантом обработки № 2 + ПДО. При этом преимущества данного варианта по меньшей чувствительности к концентратору проявляется все в большей степени по мере уменьшения  $r$  (что приводит к росту локального повышения напряжений в зоне концентратора). Если сравнивать вариант № 1 + ПДО с вариантом № 3, то видно, что преимущества его не столь значительны и особенно при малых значениях  $r$ .

На основе микроструктурных исследований можно констатировать, что формирование после закалки и высокого отпуска структуры глобулярного сорбита отпуска перед ПДО оказывается более благоприятным для сопротивления усталости, чем структуры феррита и пластинчатого сорбита после нормализации.

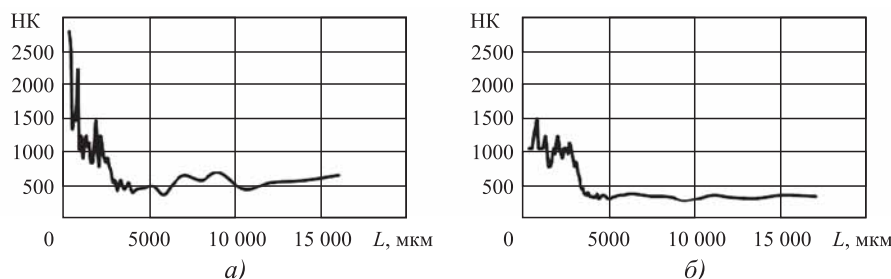
Данные по измерению микротвердости НК в анализируемых образцах и характер ее рас-

**3. Результаты измерения микротвердости и размеров зон образца**

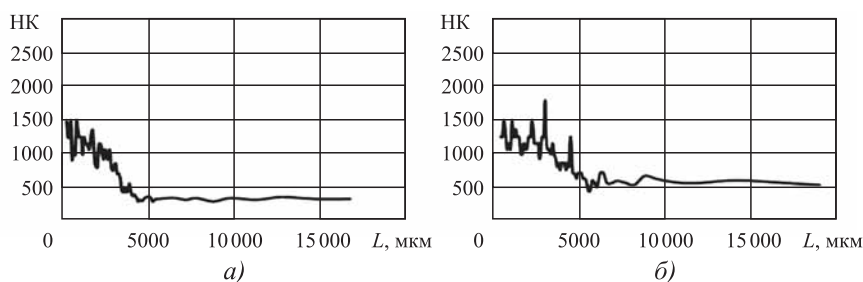
Номер варианта обработки	Радиус галтели $r$ , мм	Микротвердость НК в зоне разрушения	Протяженность зоны, мм	
			I	II
3	0,5	2750	0,80	2,20
	1,0	1850	1,80	2,04
	3,0	1490	2,00	1,97
	5,0	1000	3,09	1,10
3 + ПДО	0,5	2800	1,58	2,03
	1,0	1910	2,15	2,13
	3,0	1360	3,01	2,00
	5,0	1050	3,86	1,35
1	0,5	2690	2,80	1,02
1 + ПДО		2710	2,86	1,17
2		2690	2,85	1,06
2 + ПДО		2700	3,01	1,42

пределения в зависимости от варианта обработки и радиуса галтели приведены в табл. 3 и на рис. 4 и 5, где  $L$  — расстояние от поверхности излома. В табл. 3 представлены также результаты измерения протяженности зон I и II.

Выявлено, что на всех образцах после проведения испытаний на усталость наблюдается снижение микротвердости от зоны разрушения до основной зоны образца. На микротвердость в зоне разрушения заметно влияет радиус галтели: чем больше радиус галтели, тем меньше значение микротвердости в этой зоне образца. Образцы с вариантом обработки № 3 при радиусах галтели 0,5 и 5 мм име-



**Рис. 4. Распределение микротвердости в образце с вариантом обработки № 3:**  
 а —  $r = 0,5$  мм; б —  $r = 5$  мм



**Рис. 5. Распределение микротвердости в образце с радиусом галтели  $r = 3$  мм:**  
 а — вариант обработки № 3; б — вариант обработки № 3 + ПДО

ют микротвердость в зоне разрушения 2750 и 1000 НК соответственно (см. табл. 3).

Установлено, что ПДО не оказывает сильного влияния на значение микротвердости в зоне разрушения, однако в основной зоне III (см. рис. 2) микротвердость после ПДО возрастает на 100...200 НК. Данный факт проиллюстрирован на рис. 5, где показано распределение микротвердости на образцах без термической обработки с галтелями одного радиуса в неупрочненном (см. рис. 5, а) и упрочненном ПДО (см. рис. 5, б) состояниях.

Протяженность зоны I возрастает с увеличением радиуса галтели. Если на образцах с  $r = 0,5$  мм (вариант обработки № 3) длина устойчивого упрочнения составляет примерно 0,8 мм, то при  $r = 5$  мм ее длина увеличивается до 3,09 мм.

Протяженность зоны II, где наблюдается плавное, монотонное снижение микротвердости, несколько уменьшается при увеличении радиуса галтели. Суммарная протяженность области влияния зоны разрушения на микротвердость (протяженность зон I и II) при этом возрастает. Для варианта обработки № 3 и  $r = 0,5$  мм протяженность области влияния составляет 3,0 мм, а при  $r = 5$  мм — 4,19 мм.

Таким образом, по мере увеличения интенсивности действия концентратора (уменьшение его радиуса) происходит все большая локализация интенсивных структурных изменений в зоне I, прилегающей к зоне разрушения. При этом термическая обработка стали и ПДО уменьшают степень локализации, что повышает предел выносливости материала.

## Выводы

1. Термическая обработка стали 20 с последующей пневмодробеструйной обработкой снижают чувствительность стали к концентраторам напряжений при усталостных испытаниях. Коэффициент концентрации напряжений может снижаться с 1,88 до 1,4, а предел выносливости увеличиваться от 128 до 211 МПа.

2. Положение опасного сечения детали с галтельным переходом зависит от радиуса галтели и при увеличении радиуса смещается к наименьшему сечению образца с галтелью. При этом по мере повышения интенсивности действия концентратора (уменьшение его радиуса) происходит все большая локализация интенсивных структурных измене-

ний в зоне материала, прилегающей к зоне разрушения.

3. Проведение термической обработки стали 20 (нормализации или закалки с высоким отпуском) с последующей пневмодробеструйной обработкой позволяет уменьшать степень локализации структурных изменений и повышать сопротивление усталости.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Павлов В.Ф., Кирпичев В.А. Влияние вида концентратора на зависимость предела выносливости упрочненных деталей от остаточных напряжений // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. Технические науки. 2006. № 3. С. 31–34.
2. Кирпичев В.А. Прогнозирование предела выносливости поверхностного упрочнения деталей с концентраторами при различных видах деформации // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2008. № 3 (7). С. 138–142.
3. Терентьев В.Ф. Усталость металлических материалов. М.: Наука, 2002. 248 с.
4. Казарновский Д.С., Левченко Н.Ф., Бихунов Л.Я. Циклическая прочность и чувствительность к концентраторам напряжений высокоуглеродистых

сталей // Известия академии наук СССР. Сер. Металлы. 1984. № 5. С. 147–153.

5. Беляев М.С., Жуков Н.Д. Влияние концентрации напряжений на сопротивление усталости жаропрочных никелевых сплавов // Проблемы прочности. 1984. № 5. С. 10–14.

6. К вопросу оценки характеристик сопротивления усталости конструкционных материалов / С.А. Баженов, А.И. Баженов, В.Ю. Коцюба, С.Н. Пахолка // Вестник двигателестроения. 2004. № 4. С. 66–71.

7. Баженов С.А., Соболевская Т.Д. Исследование влияния химического состава и структуры углеродистых сталей на характеристики сопротивления усталости // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. 2007. № 1. С. 20–26.

8. Bruce Boardman. Fatigue Resistance of steels. Asm Handbook. Vol. 1: Properties and Selection: Irons, Steels and High-performance Alloys. 1990. P. 613–688.

9. Исследование методом конечно-элементного моделирования характера образования изломов образцов с галтелями по результатам испытаний на усталость / В.С. Вакулук, В.П. Сазанов, А.А. Филиппов, А.П. Морозов, Д.Ю. Кожевников // Труды девятой Всероссийской научной конференции с международным участием. Часть 1. Самара, 2013. С. 75–79.

*Елена Александровна Морозова, канд. техн. наук;  
Андрей Павлович Морозов, канд. техн. наук;  
Владимир Сергеевич Муратов, д-р техн. наук,  
ftf@samgtu.ru*

## Третья Международная научно-техническая конференция "Павловские чтения",

посвященная 120-летию со дня рождения члена-корреспондента АН СССР

### Павлова Игоря Михайловича

Организаторы: Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, НИТУ "МИСиС", Санкт-Петербургский государственный технический университет при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, ОХНМ РАН, РФФИ

26—27 ноября 2020

Место проведения: Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН

#### Вопросы, рассматриваемые в рамках конференции:

1. Общие вопросы обработки металлов давлением
2. Прогрессивные технологии пластической деформации
3. Создание новых материалов методами пластической деформации

#### Контакты:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН)

**Адрес:** Москва, 119334, Ленинский проспект, д. 49

**Телефоны:** +7 (499) 135-96-62, (499) 135-86-51

**Сайт:** <http://wwwpavlov.imetran.ru>

П.А. Цирков, В.Г. Вялков, С.Н. Глазунов, Л.Д. Варламова  
(Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет))

## Способ восстановления электродуговой наплавкой изношенных поверхностей изделий, изготовленных из чугуна и стали

*Исследование посвящено способу для восстановления электродуговой наплавкой изношенных цилиндрических и плоских поверхностей изделий, изготовленных из чугуна и стали доступной сварочной проволокой Св-08ГС (Св-08Г2С) на умеренных сварочных токах.*

**Ключевые слова:** восстановление изделий из чугуна и стали; легирование наплавленного слоя; уменьшение сварочных деформаций и напряжений; уменьшение глубины проплавления основного металла; устойчивое горение дуги; формирование качественного бездефектного наплавленного слоя.

*The study is devoted to method for restoration of worn cylindrical and flat surfaces of products made of cast iron and steel using ER70S-6 welding wire at moderate welding currents by electric arc surfacing.*

**Keywords:** restoration of cast iron and steel products; doping of deposited layer; reduction of welding strains and stresses; reduction of base metal penetration; steady arc burning; formation of high-quality defect-free deposited layer.

Ежегодно миллионы деталей выбраковываются и поступают на переплавку из-за износа в процессе эксплуатации рабочих поверхностей, которые можно отремонтировать различными способами восстановления.

Восстановление изношенных деталей является важным резервом экономии трудовых и материальных ресурсов. Стоимость восстановления деталей значительно ниже стоимости их изготовления, так как восстановление исключает такие трудозатратные, энерго- и материалоемкие процессы, как переплав (при утилизации изношенного изделия), литье, штамповка и механическая обработка (при изготовлении нового изделия). Например, при производстве автомобильных деталей расходы на материалы, изготовление заготовок (отливок, штамповок) и их механическую обработку составляют 70...75 % стоимости этих изделий. При восстановлении деталей эти затраты составляют 10...30 %, так как заготовкой является сама деталь и при этом обрабатываются только те поверхности, которые подвергались ремонту. При этом чем сложнее деталь и, следовательно, чем дороже она в изготовлении, тем ниже относительные затраты на ее восстановление.

Износ поверхностей исправляется нанесением покрытий способами напыления и наплавки.

Напыление дает возможность получать покрытия толщиной до 1,0 мм. Однако степень износа поверхности детали может достигать 2 мм и более, что существенно превышает технологические возможности напыления. Сложные условия эксплуатации (например, наличие больших знакопеременных нагрузок, циклического термомеханического воздействия, абразивного износа, воздействия агрессивной среды) могут привести к отслоению напыленного слоя от основного металла вследствие недостаточной прочности их сцепления.

Наплавка позволяет получать за один проход слой толщиной более 1 мм. При этом прочность сцепления наплавленного слоя с основным металлом значительно превышает аналогичный показатель в случае напыления поверхностного слоя.

Один из наиболее универсальных способов, включающий в себя гибкие технологические приемы воздействия на свойства наплавленного слоя, — электродуговая наплавка ферромагнитной шихтой [1].

Способ электродуговой наплавки ферромагнитной шихтой позволяет восстанавливать поверхности деталей, изготовленных из широкого спектра материалов (чугуны и стали).

Сварочными материалами при электродуговой наплавке являются сварочная проволока и ферромагнитная шихта, состав которой зависит от материала восстанавливаемого изделия [2].

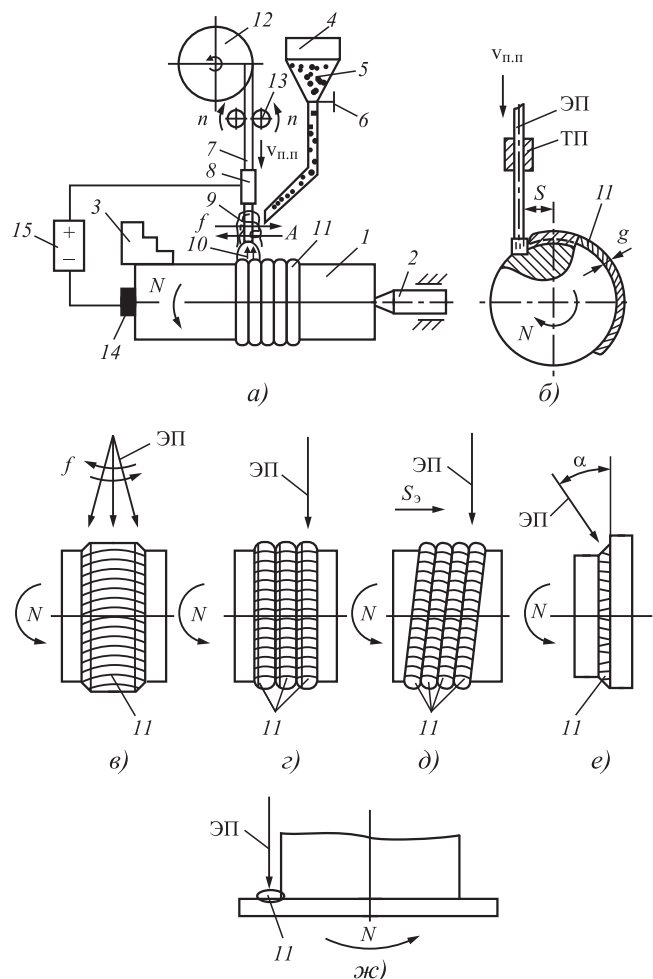
В качестве сварочной проволоки применяют проволоку Св-08Г2С диаметром 1,6 мм.

Легирование наплавляемого слоя, устойчивое горение дуги, а также защита дуги и сварочной ванны от влияния атмосферы осуществляются ферромагнитной шихтой. В состав шихты входят доступные порошкообразные компоненты, используемые при изготовлении защитно-легирующего покрытия сварочных электродов. Компоненты шихты обладают различными магнитными свойствами. Магнитные свойства шихты в целом обеспечиваются слипанием магнитных и немагнитных компонентов. Для этого составляющие компоненты шихты замешиваются на жидком натриевом стекле. Готовая к применению ферромагнитная шихта получается после прокаливании полученной увлажненной смеси в печи при температуре 400 °С до полного ее просыхания и последующего просеивания через сито № 04 [1].

Схема процесса наплавки представлена на рис. 1.

Наплавляемая заготовка закрепляется с помощью трехручачкового патрона 3 и центра 2 (см. рис. 1). Наплавка может выполняться с поперечными колебаниями (широкослойная наплавка) и узкими валиками без колебаний электродной проволоки (см. рис. 1, *з*, *д*, *е*, *ж*). Включаются вращение заготовки и в случае широкослойной наплавки колебания сварочной проволоки с амплитудой  $A$  и частотой  $f$ . Из бункера 4 осуществляется дозированная (с помощью дозатора 6) подача ферромагнитной шихты 5, представляющей собой гранулированную спеченную смесь тонко помолотых материалов.

От источника питания 15 к сварочной проволоке 7 и изделию 1 подается ток наплавки. Между торцом сварочной проволоки и поверхностью наплавляемой заготовки зажигается сварочная дуга 10. Ток наплавки, проходя по сварочной проволоке, создает вокруг нее магнитное поле. Шихта, обладающая магнитными свойствами, притягивается в месте сыпания к сварочной проволоке и создает вокруг нее покрытие 9. Сварочная проволока с покрытием с помощью механизма подачи проволоки 13 поступает в зону сварочной дуги, расплавляется и наносится на



**Рис. 1. Схема наплавочной головки и способов наплавки валиков при электродуговой наплавке ферромагнитной шихтой:**

*a* — схема наплавочной головки и наплавки цилиндрической поверхности детали типа вал с горизонтальной осью вращения; *б* — схема смещения электродной проволоки от "зенита"; *в* — схема наплавки цилиндрической поверхности тела с горизонтальной осью вращения с поперечными колебаниями электродной проволоки (широкослойная наплавка); *г* — схема наплавки цилиндрической поверхности тела с горизонтальной осью вращения без колебаний электродной проволоки (наплавка узкими валиками); *д* — схема наплавки по "винту" цилиндрической поверхности тела с горизонтальной осью вращения без колебаний электродной проволоки; *е* — схема наплавки кольцевого углового валика без колебаний электродной проволоки; *ж* — схема наплавки плоской поверхности тела с вертикальной осью вращения без колебаний электродной проволоки; 1 — наплавляемая заготовка; 2 — центр; 3 — трехручачковый патрон; 4 — бункер; 5 — ферромагнитная шихта (порошкообразная сухая масса); 6 — дозатор, регулирующий количество расходуемой шихты; 7 — электродная (сварочная) проволока; 8 — скользящий токоподвод сварочной головки, обеспечивающий подачу напряжения на сварочную проволоку; 9 — покрытие из ферромагнитной шихты; 10 — сварочная дуга; 11 — наплавленный слой; 12 — кассета со сварочной проволокой; 13 — механизм подачи проволоки; 14 — скользящий токоподвод, обеспечивающий подачу напряжения на наплавляемую заготовку; 15 — источник питания постоянного тока; ТП — скользящий токоподвод; ЭП — электродная проволока;  $S_3$  — поступательное перемещение наплавочной головки;  $S$  — смещение электродной проволоки от "зенита";  $g$  — толщина наплавленного слоя;  $\alpha$  — угол наклона электродной проволоки;  $N$  — частота вращения наплавляемой заготовки;  $v_{п.п}$  — скорость подачи сварочной проволоки;  $n$  — частота вращения роликов подающего механизма;  $A$  — амплитуда поперечных колебаний сварочной проволоки;  $f$  — частота колебаний электродной проволоки

поверхность наплавляемого изделия. После охлаждения и кристаллизации расплавленного металла образуется наплавленный слой *II*.

При кольцевой наплавке цилиндрических поверхностей возникают некоторые дополнительные требования к ведению процесса наплавки, связанные с влиянием кривизны изделия на формирование наплавляемого слоя. Для улучшения формирования наплавки и предотвращения стекания ванны жидкого металла по направлению вращения изделия торец электродной проволоки смещается с верхней точки цилиндрической поверхности ("зенита") в сторону, обратную вращению на определенную величину  $S$  (см. рис. 1, б). Однако при этом необходимо иметь в виду, что чрезмерное смещение электрода может вызвать стекание ванны расплавленного металла в сторону, обратную вращению. Величина этого смещения зависит от параметров наплавки и диаметра наплавляемой цилиндрической поверхности.

Способ электродуговой наплавки ферромагнитной шихтой цилиндрических (см. рис. 1, а—е) и плоских (см. рис. 1, ж) поверхностей можно использовать для восстановления утраченного в процессе эксплуатации объема (восстановительная наплавка) и при изготовительной наплавке. Изготовительная наплавка позволяет увеличить срок службы детали в результате нанесения на поверхность готового изделия специального слоя с особыми свойствами, отвечающими необходимым требованиям эксплуатации и, как правило, отличающимися от свойств основного металла.

### Выводы

1. Способ позволяет наплавлять цилиндрические и плоские поверхности с колебаниями (широкослойная наплавка) и узкими валиками без колебаний электродной (сварочной) проволоки.
2. Наплавка выполняется относительно недорогой и доступной сварочной проволокой марки Св-08ГС (наплавка деталей из чугуна) и Св-08Г2С (наплавка деталей из легированных сталей).
3. Применение сварочной проволоки малого диаметра (1,6 мм) позволяет использовать умеренные токи наплавки 160...170 А, обеспечивающие не только незначительные сварочные деформации и напряжения, но и малую глубину проплавления основного металла.
4. Легирование наплавленного слоя осуществляется элементами сварочной проволоки и ферромагнитной шихты.

5. Варьирование химического состава шихты позволяет восстанавливать изношенные поверхности деталей, изготовленных из разных марок сталей и чугунов.

6. Устойчивое горение дуги, формирование качественного наплавленного слоя без пор, горячих и холодных трещин, шлаковых включений, а также необходимые эксплуатационные свойства наплавленной поверхности обеспечиваются определенным составом ферромагнитной шихты.

7. Применение разработанной комбинации наплавочных материалов и параметров наплавки обеспечивает получение бездефектных изделий, отвечающих необходимым эксплуатационным требованиям без дополнительных технологических мероприятий (подогрев изделия в процессе изготовления/восстановления и последующей его термической обработки).

8. Компоненты шихты не являются дефицитными, так как их широко используют при изготовлении покрытых электродов.

9. Способ обеспечивает возможность визуального наблюдения за процессом наплавки и, как следствие, своевременной корректировки параметров наплавки в случае нарушения устойчивости сварочного процесса.

10. Способ применим не только при восстановительной наплавке, но и при изготовительной, особенно в том случае, когда свойства наплавленного слоя должны существенно отличаться от свойств основного металла.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Ферромагнитная шихта для дуговой наплавки деталей машин, изготовленных из железоуглеродистых сплавов:** пат. 2448823 Российская Федерация: МПК В23К 35/36 / Э.Л. Макаров, В.Г. Вялков, С.Н. Глазунов, А.В. Коновалов, Д.В. Апраксин. № 2010104100/02; заявл. 09.02.2010; опубл. 27.04.2012, Бюл. № 12. 7 с.
2. **Вялков В.Г., Глазунов С.Н., Цирков П.А.** Расчет химического состава наплавочных материалов и наплавленного слоя при электродуговой наплавке ферромагнитной шихтой // Труды ГОСНИТИ. 2018. Т. 130. С. 232—237.

*Павел Александрович Цирков;*

*Вадим Геннадиевич Вялков, канд. техн. наук;*

*Сергей Николаевич Глазунов, канд. техн. наук;*

*Любовь Дмитриевна Варламова,*

*mt13welding@gmail.com*

ООО "Издательство "Иновационное машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2

Учредитель ООО "Издательство "Иновационное машиностроение". E-mail: [zpm@mashin.ru](mailto:zpm@mashin.ru)

Тел. редакции журнала: (499) 268-47-19, 269-54-96. <http://www.mashin.ru>

Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*

Сдано в набор 07.05.2020. Подписано в печать 29.06.2020. Формат 60 × 88 1/8.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.

Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Авансед солюшнз".

119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: [www.aov.ru](http://www.aov.ru)

Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.



# Поздравляем

**Энгеля Фёдоровича Богданова,**  
**д-ра техн. наук, профессора**  
**с 95-летием!**

Э.Ф. Богданов родился 9 июля 1925 г. в городе Новгороде в семье военного. Великую Отечественную войну встретил в городе Каунасе, где успел закончить 8 классов. В эвакуации в городе Уфе бросил школу и пошел работать на моторный завод фрезеровщиком.

С 1944 г. воевал на 2-м Украинском фронте, был тяжело ранен. После демобилизации закончил среднюю школу и поступил в МВТУ им. Н.Э. Баумана. В 1954 г. закончил МВТУ им. Н.Э. Баумана и был оставлен на кафедре "Обработка металлов давлением" (в настоящее время "Технологии обработки давлением"), на которой проработал до 2011 г.

После защиты в 1963 г. кандидатской диссертации на тему "Исследование влияния давления рабочей жидкости на параметры цилиндров гидравлических прессов" Э.Ф. Богданов начал читать курсы лекций "Кузнечно-штамповочное оборудование" и "Нагрев металлов и нагревательные устройства".

Главный период научной деятельности Энгеля Фёдоровича связан с разработкой математической модели функционирования системы главного привода кривошипных прессов при штамповке одиночными ходами и методики оптимизации электропривода. Для завода "Воронежтяжмехпресс" была проведена оптимизация параметров электропривода (момента инерции маховика и мощности электродвигателя) всей гаммы кривошипных горячештамповочных прессов силой до 125 МН. Например, мощность привода без уменьшения производительности прессы силой 25 МН была снижена со 125 до 90 кВт. Таких прессов только за 15 лет было выпущено более 150, из них каждый третий — на экспорт. У кривошипных горячештамповочных прессов силой 125 МН мощность привода была уменьшена на 23 %. У всех прессов было значительно снижено потребление электроэнергии и повышен общий КПД.

По результатам этих исследований в 1984 г. Э.Ф. Богданов защитил докторскую диссертацию на тему "Разработка методов расчета энергоэкономичных систем главного привода кривошипных прессов" и ему было присвоено звание профессора.

Энгель Фёдорович разработал методики проектировочного расчета основных параметров фрикционных муфт кривошипных прессов, в 1994 г. было опубликовано его учебное пособие "Расчет процессов включения дисковых муфт и тормозов кривошипных прессов".

Э.Ф. Богданов — автор более 100 научных и методических работ.

В настоящее время Энгель Фёдорович продолжает активную научно-методическую деятельность. В 2019 г. он подготовил рукопись пособия по измерению толщины зубьев эвольвентных передач, а также рукопись курса лекций по нагревательным устройствам дляковки и штамповки.

Энгель Фёдорович Богданов награжден орденом Отечественной войны I степени и многими медалями.

*Коллектив редакции и редакционный совет журнала от всей души желают  
Энгелю Фёдоровичу крепкого здоровья, благополучия и творческих успехов!*