

**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.
КОТЕНОК 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

- Разумов М.С., Глазков П.В., Кочергин В.С., Бышкин А.С.** Определение погрешности выявления скрытых дефектов методом гидростатического взвешивания в деталях, полученных методом литья 339
- Филяков А.Е.** Технологические аспекты образования дефектов при сварке магистральных трубопроводов 343
- Михайлицын С.В., Шекшеев М.А., Сычков А.Б., Емельюшин А.Н.** Разработка самозащитной порошковой проволоки диаметром 1,6 мм для автоматической сварки корня шва стыков трубопроводов 349

Кузнечно-штамповочное производство

- Дмитрюк А.И., Григорьев А.А.** Совершенствование технологии прессования алюминиевых заготовок 353
- Петров М.А.** Компьютерное моделирование процессов листовой штамповки с использованием моделей трения AutoForm и TriboForm 359

Прокатно-волочильное производство

- Поворов С.В., Егоров Д.В., Волгин Д.С.** Определение силы резания гнущего профиля проката в гильотине с фасонными матрицами и ножом 373

Материаловедение и новые материалы

- Грушко О.Е., Овсянников Б.В., Овчинников В.В.** Влияние микролегирования кальцием на технологические свойства листов сплава В-1341 377

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

- Razumov M.S., Glazkov P.V., Kochergin V.S., Byshkin A.S. Error determination of hidden flows by hydrostatic weighing in parts obtained by casting 339
- Filyakov A.E. Technological aspects for formation of defects during welding of main pipelines 343
- Mikhaylitsyn S.V., Sheksheev M.A., Sychkov A.B., Emelyushin A.N. Development of self-protective powder wire with diameter of 1.6 mm for automatic welding of pipe-lines joints root 349

Forging and Stamping Production

- Dmitryuk A.I., Grigor'ev A.A. Enhancement of aluminum billets extrusion technology 353
- Petrov M.A. Comparison of numerical simulation results of sheet metal parts' production for AutoForm and TriboForm friction models 359

Rolling and Drawing Production

- Povorov S.V., Egorov D.V., Volgin D.S. Determination of cutting force of roll-formed section in shaped dies-knife guillotine 373

Physical Metallurgy and New Materials

- Grushko O.E., Ovsyannikov B.V., Ovchinnikov V.V. Effect of calcium microalloying on processing properties of B-1341 alloy sheets 377

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 621.74

DOI: 10.36652/1684-1107-2020-18-8-339-342

М.С. Разумов¹, П.В. Глазков¹, В.С. Кочергин^{1,2}, А.С. Бышкин¹
(¹Юго-Западный государственный университет, г. Курск, ²АО "Геомаш", г. Щигры)

Определение погрешности выявления скрытых дефектов методом гидростатического взвешивания в деталях, полученных методом литья*

Рассмотрены существующие методы обнаружения дефектов литья и их недостатки. Предложен метод гидростатического взвешивания для выявления скрытых дефектов с помощью сравнения эталонной и вычисленной плотностей отливки и рекомендован способ расчета погрешности. Проведена проверка адекватности теоретических расчетов экспериментальным путем.

Ключевые слова: литье; дефекты; заготовка; раковины; метод гидростатического взвешивания.

The existing methods for detecting of casting defects and their disadvantages are considered. Hydrostatic weighing method is proposed for detecting of hidden flaws by comparing the reference and calculated densities of the casting, method for calculating of the error is recommended. The adequacy of theoretical calculations is verified experimentally.

Keywords: casting; defects; blank; cavities; hydrostatic weighing method.

Литье — один из самых распространенных методов получения деталей и заготовок. Распространение данный метод получил благодаря возможности получать заготовки сложной формы и большой массы, при этом расходуя минимальное количество сырья. Однако в литейном производстве существует вероятность образования дефектов в отливках [1].

Дефекты можно разделить на две большие подгруппы: явные и скрытые дефекты литья.

Явный дефект выявляется при визуальном контроле или предписанными в нормативной документации инструментальными средствами и методиками дефектоскопии.

Скрытый дефект — это дефект, не обнаруживаемый при внешнем осмотре. Скрытые дефекты иногда выявляются в процессе механической обработки отливок, что приводит к дополнительным затратам на изготовление

новой заготовки или в процессе эксплуатации изделий, это может вызвать аварийную ситуацию и предъявление рекламации к заводу-изготовителю. Регистрация скрытых дефектов является сложным и трудозатратным мероприятием [2]. Существует несколько разрушающих методов регистрации скрытых дефектов в отливках, такие как: ультразвуковой, магнитный, рентгеновский. Но эти методы имеют ряд недостатков: высокая стоимость оборудования; длительное время проведения дефектовки; сложность проведения работ [3].

Данные методы целесообразно применять к заготовкам ответственных деталей, где себестоимость изделия носит второстепенную значимость по сравнению с качеством. Однако существуют детали, где конструкторская документация позволяет допускать регламентированное количество скрытых дефектов. В связи с этим актуальной задачей является разработка менее затратного и простого метода определения внутренних дефектов литья.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90108.

Предложен экспресс-метод гидростатического взвешивания для определения скрытых дефектов. Данный способ направлен на определение внутренних дефектов, при которых дальнейшее использование заготовки становится невозможно и признается браком. Основное преимущество данного метода — малое время определения дефектности заготовки, что позволяет проверять большее число заготовок. При этом возможно снижение отбраковки деталей, полученных методом литья, на дальнейших этапах обработки заготовки, тем самым повышается эффективность производства.

Суть метода основана на сравнении плотности эталонной и испытуемой отливок с последующим определением степени дефектовки детали по разнице значений плотности (рис. 1).

Данный метод работает следующим образом:

1. Замеряют массу отливки.

2. Отливку погружают в емкость с жидкостью известной плотностью (дистиллированная вода для отливок с качественной поверхностью, керосин для лучшей проникающей способности в поверхностные поры) и замеряют массу жидкости, вытесненной отливкой с помощью весов, на которые поставлена емкость, при этом отливку опускают в жидкость до полного погружения, не касаясь стенок и дна емкости.

3. Рассчитывают по формуле плотность данной отливки:

$$\rho_i = \frac{m}{V \rho_1},$$

где m — масса отливки; V — объем вытесненной жидкости отливкой; ρ_i — плотность i -го образца; ρ_1 — плотность выбранной жидкости.

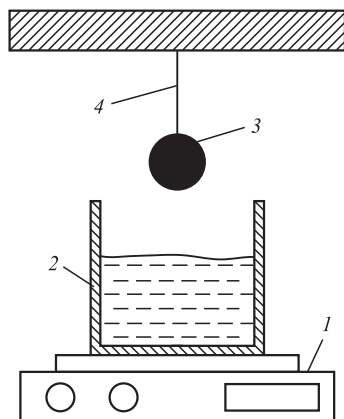


Рис. 1. Принципиальная схема измерения:

1 — весы; 2 — емкость с водой; 3 — отливка; 4 — плита для погружения отливки

4. Полученные результаты сравнивают с эталонным значением и при разности показаний выше допустимых пределов определяют дефект в отливке.

Основным вопросом при реализации данного метода является точность измерения. В связи с этим необходимо рассчитать погрешность данного метода для определения, при каких условиях и оборудовании данный способ будет давать адекватную оценку дефектности детали.

Погрешность при измерении плотности можно вычислить по формуле

$$\Delta y = \frac{1}{V} \Delta m + \frac{m}{V^2} \Delta V,$$

где Δy — максимально возможная погрешность измерения плотности при данных условиях; Δm — погрешность при измерении массы заготовки (обычно указывают в технической документации к весам); ΔV — погрешность при измерении объема заготовки (так как объем измеряют на тех же весах, то и погрешность будет иметь одинаковое значение, как при измерении массы).

В целях проверки адекватности предложенной формулы провели экспериментальные исследования. Для осуществления практической реализации данного метода изготовили три образца из алюминиевого сплава прямоугольной формы (рис. 2). В качестве жидкости использовали дистиллированную воду, так как образцы предварительно полировали.

Найдем плотность данных образцов, полученные данные запишем в табл. 1.

При проведении экспериментальных исследований применяли весы с погрешностью $\pm 0,01$ г.

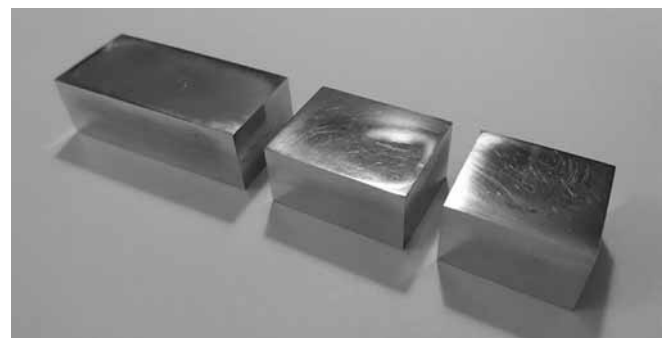


Рис. 2. Образцы из алюминиевого сплава прямоугольной формы

1. Плотность образцов без дефектов, полученная предложенным методом

Номер образца	m , г	V , см ³	ρ , г/см ³
1	38,37	13,75	2,79
2	23,39	8,38	2,791
3	17,92	6,43	2,787

Определим погрешность измерения для каждого образца:

$$\Delta y_1 = \frac{1}{13,75} \cdot 0,02 + \frac{38,37}{13,75^2} \cdot 0,02 \approx 0,006;$$

$$\Delta y_2 = \frac{1}{8,38} \cdot 0,02 + \frac{23,39}{8,38^2} \cdot 0,02 \approx 0,009;$$

$$\Delta y_3 = \frac{1}{6,43} \cdot 0,02 + \frac{17,92}{6,43^2} \cdot 0,02 \approx 0,012.$$

При сравнении измеренной плотности образцов предложенным методом максимальная разница составила 0,004, а минимальная расчетная — 0,006, что позволяет сделать вывод о достаточной точности измерений и правильности теоретических вычислений.

Найдем минимальный объем внутренней полости для каждого из трех образцов, который можно зафиксировать данным методом:

$$V_i = \frac{m}{\rho - \Delta y} - V_3,$$

где V_i — минимальный объем полости i -го образца; ρ — плотность эталонной заготовки; V_3 — объем заготовки;

$$V_1 = \frac{38,37}{2,789 - 0,006} - 13,75 \approx 0,037 \text{ см}^3;$$

$$V_2 = \frac{23,39}{2,789 - 0,009} - 8,38 \approx 0,034 \text{ см}^3;$$

$$V_3 = \frac{17,92}{2,789 - 0,012} - 6,43 = 0,023 \text{ см}^3,$$

где V_1, V_2, V_3 — объем минимальной полости соответствующих образцов.

Для оценки точности предлагаемого метода определим соотношение Z объема всей детали к объему полости, который можно зарегистрировать данным методом, в процентах: образец № 1 — 0,27 %; образец № 2 — 0,4 %; образец

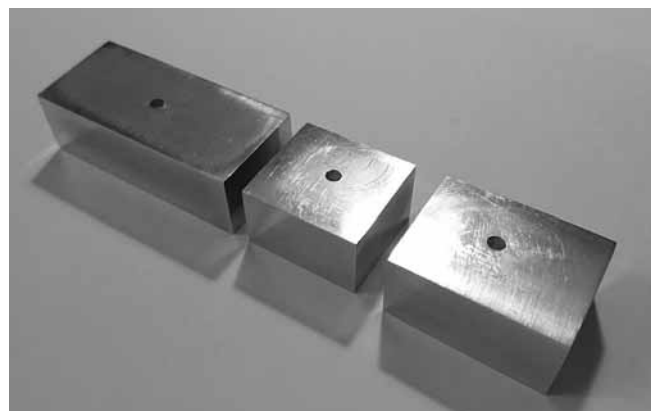


Рис. 3. Образцы с высверленными отверстиями

№ 3 — 0,36 %. По анализу ряда предприятий Курской области с точностью до 1 % данный метод можно использовать для 80 % заготовок, полученных литьем. В среднем по расчетам $Z = 0,34$ %, дальнейшие исследования проведем по максимальному значению 0,4 %.

Экспериментальным путем проверим возможность определения минимального объема полости в данных образцах. Для этого сделали полости с $Z = 0,4$ % (рис. 3), далее их заклеили небольшим кусочком скотча (погрешностью, вносимой кусочком скотча, можно пренебречь) и полученные заготовки протестировали методом гидростатического взвешивания. Полученные данные запишем в табл. 2.

При сравнении измеренной плотности образцов с дефектом предложенным методом максимальная разница составила 0,004, а минимальная расчетная — 0,006, что позволяет сделать вывод о достаточной точности измерений и правильности теоретических вычислений.

Таким образом, практическая точность реализации способа в данном случае оказалась выше расчетной, что свидетельствует об адекватности предложенного метода расчета. Данный метод можно применять для текущего

2. Плотность образцов с дефектами

Номер образца	m , г	V , см ³	ρ_i	ρ	$ \rho - \rho_i $	Δy
			г/см ³			
1	38,27	13,74	2,785	2,789	0,004	0,006
2	23,29	8,38	2,779		0,001	0,009
3	17,86	6,43	2,778		0,011	0,012

контроля качества отливок для отбраковки деталей, имеющих скрытые дефекты, которые невозможно определить внешним осмотром. Если деталь признается бракованной, то ее можно подвергнуть разрушающим методам контроля для определения типа дефекта и причины его возникновения (усадочная пористость, усадочная раковина, газовая пористость и т.п.) и назначить адекватные технологические мероприятия по его устранению. Это может существенно сократить время для проверки всех заготовок, так как данный метод имеет малое время проведения контроля.

Заключение. Рассмотрен способ обнаружения скрытых дефектов в деталях, полученных методом литья, методом гидростатического взвешивания и предложен способ расчета погрешности данного способа, проведена проверка экспериментальным путем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Метод** обнаружения скрытых дефектов в деталях, полученных методом литья / М.С. Разумов, П.В. Глазков, Н.Д. Вязников, А.С. Бышкин, А.В. Вантеев // Современные материалы, техника и технология: сб. науч. статей 9-й Междунар. науч.-практ. конф. В 2 т. Ответственный редактор А.А. Горохов. 2019. С. 185–188.
2. **Виды** литейных дефектов. Режим доступа: <https://studfile.net/preview/5226425/page:14/> (дата обращения: 20.02.2020).
3. **Контроль** скрытых дефектов. Дефектоскопия. Режим доступа: <https://studfile.net/preview/2906543/page:10/> (дата обращения: 20.02.2020).

*Михаил Сергеевич Разумов, канд. техн. наук,
mika_1984_@mail.ru;
Павел Витальевич Глазков;
Виталий Сергеевич Кочергин;
Александр Сергеевич Бышкин*



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»



СПРАВОЧНИК ТЕХНОЛОГА

Под общей редакцией А.Г. Сулова

Цена 9500 руб.

2019 г. 800 с.

За последние 40 лет впервые издан совершенно новый Справочник технолога. В его написании приняли участие 69 докторов и кандидатов технических наук из 17 регионов Российской Федерации. В книге приведен справочный материал, необходимый технологу при разработке технологических процессов изготовления деталей и сборки узлов. Последовательность изложения справочного материала соответствует методологии технологической подготовки производства. Изложен справочный материал по производству заготовок, назначению припусков, базированию, технологическим способам обработки заготовок, обеспечению качества деталей и сборочных единиц, методике разработки технологических процессов, обработке заготовок, в том числе на станках с ЧПУ и обрабатывающих центрах, и сборке изделий машиностроения и авиадвигателестроения.

Приведена нормализованная технологическая документация для разработки технологических процессов. Впервые изложена методология технологической подготовки цифровых производств.

Для инженерно-технических работников промышленных предприятий, студентов, аспирантов и преподавателей технических вузов.

ПРИОБРЕСТИ КНИГУ ПО ЦЕНЕ ИЗДАТЕЛЯ МОЖНО, ПРИСЛАВ ЗАЯВКУ

по e-mail: realiz@mashin.ru

Дополнительная информация по телефону (495) 785-60-69 и на сайте WWW.MASHIN.RU

А.Е. Филяков

(Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана)

Технологические аспекты образования дефектов при сварке магистральных трубопроводов

При строительстве магистральных трубопроводов сварка является основным источником образования дефектов, поэтому для их минимизации выполняют мониторинг и документирование сварочных работ. Анализ характерных дефектов сварных швов показал доминирование внутренних дефектов формирования в виде пор, шлаковых включений и несплавлений. Установлено, что основной причиной возникновения подобных дефектов являются кратеры на поверхности предшествующих проходов, которые формируются при обрывах дуги или заниженном размахе поперечных колебаний электрода. Для повышения эффективности мониторинга процессов дуговой сварки, включающих фиксацию тока и напряжения дуги, предложено разработать специальный интеллектуальный модуль, оценивающий параметры поперечных колебаний электрода, изменение энергетических параметров дуги и осуществляющий на основе этих данных прогноз вероятности возникновения и места появления дефектов в свариваемом стыке.

Ключевые слова: магистральный трубопровод; сварка; мониторинг; дефекты сварного соединения; прогноз места расположения дефекта.

During the construction of main pipelines, welding is the main source of the formation of defects, therefore, to minimize them, monitoring and documentation of welding are performed. Analysis of the characteristic defects of the welds showed the dominance of internal formation defects in the form of pores, slag inclusions and lack of fusion. It is established that the main reason for the formation of such defects is craters on the surface of previous passes, which are formed during arc breaks or underestimated range of electrode transverse vibrations. To increase the efficiency of monitoring for the arc welding processes with fixing the current and the arc voltage, it is proposed to develop special intelligent module that estimates the parameters of electrode transverse vibrations, change in the energy parameters of the arc, and based on these data predicts the probability and place of formation of defects in the welded joint.

Keywords: main pipeline; welding; monitoring; defects of welded joint; prediction of defect location.

В соответствии со стратегией развития энергетического сектора экономики РФ основным направлением научно-технической политики освоения новых нефтяных и газовых месторождений является их обустройство и строительство новых магистральных трубопроводов, предназначенных для регулируемой транспортировки на значительные расстояния углеводородного сырья и продуктов его переработки. При этом учитывают, что магистральные трубопроводы и их инфраструктура относятся к объектам повышенной опасности, аварийные ситуации на которых могут привести к безвозвратным потерям транспортируемых продуктов, разрушениям инженерных сооружений, нанести экологический ущерб окружающей среде [1].

Поэтому с учетом, с одной стороны, значимости трубопроводов для экономики России, а с другой — последствий возникновения аварийных ситуаций одной из наиболее важных

задач эксплуатации трубопроводов является обеспечение их надежной и безопасной работы. Выявлению и анализу причин возникновения аварийных ситуаций на магистральных трубопроводах уделяется серьезное внимание [2, 3]. Проведенный литературный обзор по анализу причин возникновения аварийных ситуаций на трубопроводах позволил обобщить основные группы факторов, по которым классифицировали причины аварий и инцидентов.

Основные группы факторов, являющихся причинами аварий и инцидентов на трубопроводах, обобщены на рис. 1.

Следует отметить, что в абсолютном большинстве случаев брак при строительстве магистральных трубопроводов связан со сварочными работами [4, 5]. Причем в работе [5] однозначно указано, что доля брака по сварке превышает 50 % от общей дефектности монтажных работ. Так как именно сварочные работы зачастую становятся причинами возник-

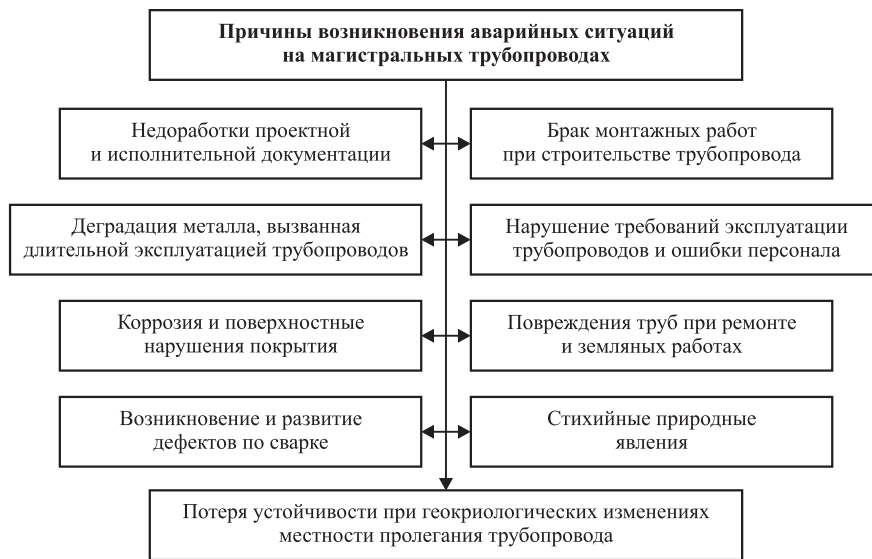


Рис. 1. Основные группы факторов, являющихся причинами аварий и инцидентов на трубопроводах

новения аварийных ситуаций при эксплуатации магистральных трубопроводов, то для минимизации вероятности их возникновения важен контроль качества сварных соединений как при строительстве, так и последующей эксплуатации трубопроводов.

В настоящее время наиболее часто используемыми методами при строительстве магистральных трубопроводов являются ручная, механизированная, а также автоматическая орбитальная сварка плавлением. В научно-технической литературе отсутствуют точные данные по соотношению объемов применения данных методов при строительстве трубопроводов. Однако по результатам опроса ведущих специалистов ПАО "Газпром" и ПАО "Транснефть" можно утверждать, что доля автоматической орбитальной сварки при строительстве линейной части магистральных трубопроводов приближается к 90 %.

Механизированную и ручную дуговую сварку в основном используют только при сварке захлестов, катушек, для присоединения датчиков, а также при устранении дефектов. Любому методу сварки и варианту его реализации, применяемому при строительстве магистральных трубопроводов, присущи характерные дефекты. Поэтому актуально рассмотрение причин их возникновения и путей прогнозирования непосредственно в ходе выполнения сварочных работ.

Цель работы — рассмотрение технологических аспектов возникновения дефектов при сварке магистральных трубопроводов и опре-

деления путей прогнозирования непосредственно в ходе выполнения сварочных работ.

Автоматическая орбитальная сварка осуществляется в защитных газах и газовых смесях. Используются сплошные, газо-защитные и самозащитные порошковые проволоки. Существуют несколько хорошо апробированных на практике технологий сварки [6]. В нашей стране и за рубежом предпочтительными процессами автоматической орбитальной сварки являются те, при реализации которых сварка корневой части шва выполняется с использованием

внутреннего медного разжимного кольца, обеспечивающего одновременно надежную фиксацию стыкуемых кромок, в случае достаточно большого диаметра трубы применяют предварительную сварку корня шва изнутри трубы. Последующее заполнение разделки также может осуществляться по нескольким вариантам.

Дефекты сварных соединений, выполненных сваркой плавлением, делятся на наружные и внутренние [7]. Наружные дефекты формы и сплошности выявляются при внешнем осмотре шва. Внутренние дефекты сплошности могут быть выявлены только специальными приборами. Особую группу внутренних дефектов представляют нарушения в структуре металла шва и ЗТВ, которые могут проявиться через увеличение концентрации оксидов, микропоры и микротрещины, крупную зернистость. Тепловой режим сварки играет решающую роль при формировании структуры шва и ЗТВ при сварке стыков из новых трубных сталей, появившихся в последние годы [8]. Так как магистральные трубопроводы работают в условиях циклического нагружения от изменения внутреннего давления перекачиваемого продукта, то дефекты сварных соединений могут стать концентраторами напряжений и проявиться как источники зарождения усталостных трещин. При этом именно трудно выявляемые внутренние дефекты являются наиболее опасными.

Характерная трещина на отводе магистрального трубопровода, развившаяся в условиях циклических нагрузок из незначительного дефекта, показана на рис. 2.



Рис. 2. Характерная трещина, развившаяся в условиях циклических нагрузок

Последствия развития трещин для магистральных трубопроводов наглядно представлены в работе [9].

В табл. 1 на основании целого ряда литературных источников обобщены данные о характерных дефектах сварных соединений магистральных трубопроводов.

Фрагменты макрошлифов с характерными дефектами представлены на рис. 3.

Сведения о распространенности характерных дефектов сварных соединений магистральных трубопроводов, выполненных разными способами сварки, приведены в табл. 2.

1. Характерные дефекты сварных соединений

Дефект	Описание дефекта	Причины возникновения
Шлаковые включения	Небольшие полости в сварном шве, заполненные неметаллическими веществами (шлаками, оксидами)	Физико-химические процессы, протекающие в сварочной ванне; загрязненность кромок; малый сварочный ток; большая скорость сварки
Металлические включения	Вольфрамовые включения при сварке неплавящимся электродом или медные, при сварке на подкладном кольце	Разрушение острия электрода из-за несвоевременной замены; оплавление медного кольца из-за затекания расплавленного металла
Поры	Полости округлой формы, заполненные газом	Загрязненность кромок; использование отсыревших электродов, влажного флюса; неэффективная защита шва при сварке в защитных газах и смесях, порошковой проволокой; повышенная скорость сварки; завышенная длина дуги; несоответствие полярности
Несплавления по кромке разделки	Несплавление основного металла с наплавленным металлом у кромок в виде тонкой прослойки оксидов или шлаковой прослойки	Электрическая дуга не оплавила боковую поверхность разделки и не сформировала слой с ее участием
Межслойные несплавления	Отсутствие соединения между отдельными валиками сварного шва	Электрическая дуга не переплавляла наружную поверхность предыдущего валика и не сформировала слой с ее участием
Подрезы	Продольное углубление на наружной поверхности сварного шва в зоне сплавления с основным металлом	Высокая скорость кристаллизации и низкая смачиваемость при растекании металла у боковой поверхности шва
Трещины	Локальные разрывы шва, вызванные растягивающими напряжениями при его охлаждении или от нагрузок	Горячие трещины от растягивающих напряжений при охлаждении сварного соединения; холодные трещины в ЗТВ или в основном металле закалочного, водородного или смешанного происхождения
Утяжины в корне шва	Неглубокая канавка со стороны корня одностороннего шва	Образование вогнутой поверхности корня шва под действием сил поверхностного натяжения
Непровар в корне шва	Несплавление кромок разделки в корневой части шва	Неспособность расплавленного металла проникнуть в корневую часть соединения
Провисы	Избыток наплавленного металла на наружной стороне шва в потолочном положении	Провисание расплавленного металла сварочной ванны под собственной массой и формирование шва с избыточной выпуклостью
Смещение кромок	Смещение сварных кромок друг относительно друга при сборке или сварке	Смещение кромок из-за овальности труб и допусков на механическую обработку кромок; термическое воздействие дуги

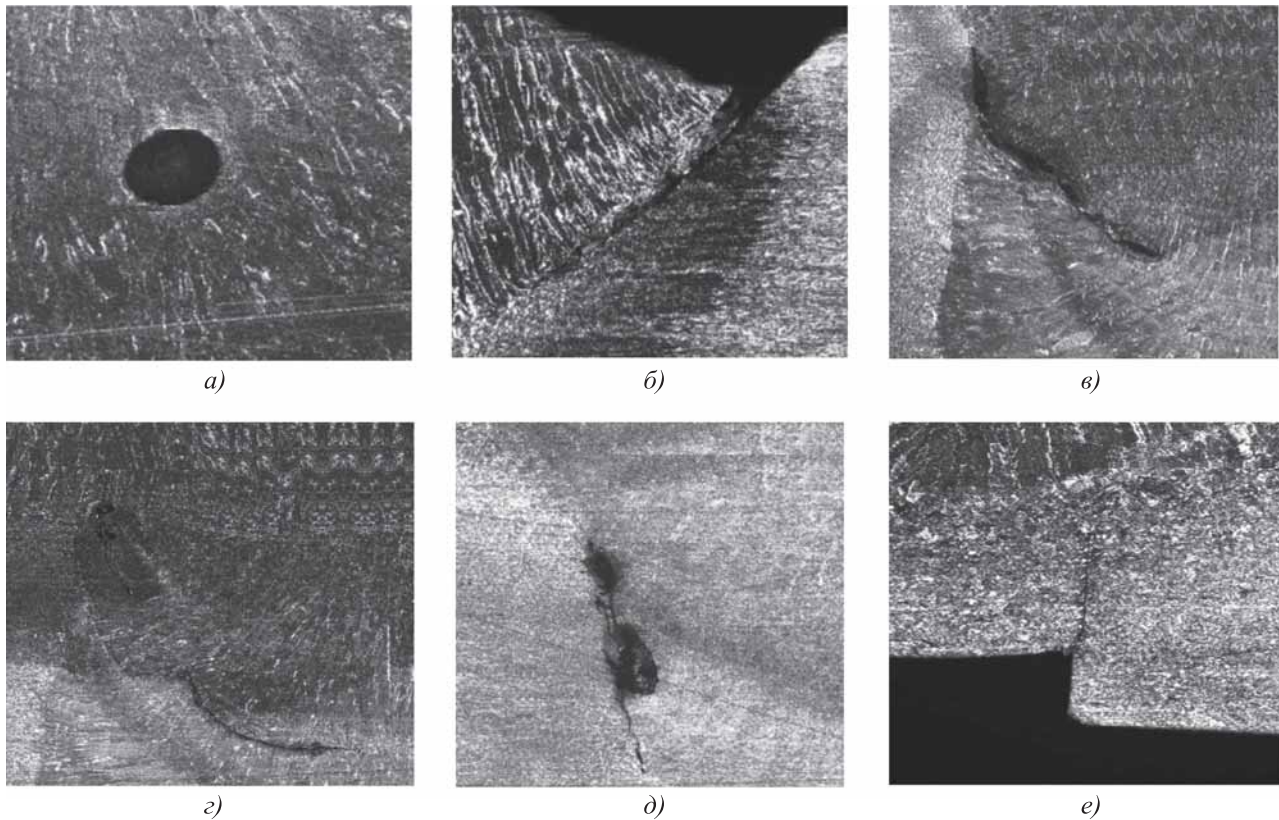


Рис. 3. Фрагменты макрошлифов с характерными дефектами, выявленными при сварке магистральных трубопроводов:
a — пора; *b* — подрез, переходящий в несплавление; *в* — несплавление по кромке; *г* — межслойное несплавление; *д* — несплавление и пора у кромки; *e* — непровар в корне шва

При реализации автоматических методов сварки возникают также следующие специфические дефекты:

- превышение усиления внутреннего корневого слоя шва (особенно на участках расположения замков) или превышение ширины облицовочного слоя шва при двухдуговой сварке;

- затекание расплавленного металла в зазор между внутренней поверхностью трубы и медным подкладным кольцом;

- превышение величины усиления шва или грубочешуйчатый шов с глубокой межваликовой канавкой в потолочной части кольцевого стыка;

2. Частота возникновения характерных дефектов при сварке магистральных трубопроводов

Дефект	Сварка		
	автоматическая	механизированная	ручная дуговая
Шлаковые включения	18,5	32	13,5
Металлические включения	1	2	2,5
Поры	22	28	22,5
Несплавления по кромке разделки	15,5	—	0,5
Межслойные несплавления	9	11,5	2,5
Подрезы	10,5	9,5	15
Трещины	2	1	0,5
Утяжины в корне шва	8	3	26
Непровар в корне шва	7	10	9
Провисы	4	3	8
Смещение кромок	2,5	—	—

— превышение регламентируемой ширины облицовочного и внутреннего слоев шва или недостаточное перекрытие первого наружного и внутреннего слоев шва из-за чрезмерного смещения осей симметрии первого наружного и внутреннего слоев шва.

Серьезные проблемы создают силы поверхностного натяжения и масса расплавленного металла ванны при формировании корня шва и заполнении разделки в потолочном положении.

Логично предположить, что выявление большего числа дефектов еще при строительстве трубопроводов позволит снизить расходы на оценку текущего состояния и обслуживание трубопроводов при эксплуатации и затраты на их ремонт.

Возникновение дефектов сварки является случайным явлением, обусловленным неблагоприятной комбинацией множества факторов [10]. Тем не менее появление большинства дефектов связано с отклонением одного или нескольких технологических параметров процесса сварки [11, 12]. Особенно технология влияет на вероятность возникновения внутренних дефектов при сварке многопроходных швов на толстостенных трубах.

При заполнении разделки кромок, как правило, сварку осуществляют с поперечными колебаниями электрода, что позволяет уменьшить число проходов и тепловложение в сварочную ванну. Амплитуда и период этих колебаний определяют формирование поверхности заполняющих валиков. При больших значениях амплитуды и периода поперечных колебаний электрода поверхность валиков формируется с наплывами и подрезами по краям, в которые затекает шлак и из которых его трудно удалить.

Неровность поверхности, наплывы и кратеры, возникающие на предыдущих проходах, являются вероятной причиной формирования внутренних пор, пустот, шлаковых включений и несплавлений. Наиболее опасно наличие глубоких кратеров малого диаметра, которые возникают в местах резкого обрыва дуги и при сварке с поперечными колебаниями с большими периодом и амплитудой. Возникновение несплавлений на месте кратеров предыдущего слоя обусловлено ограниченной проплавливающей способностью дуги, горящей в частично заполненной разделке кромок. Несплавление формируется при неполном затекании расплава ванны в кратер, которому препятствуют силы поверхностного натяжения и давление газа в замкнутой полости кратера. При сварке порошковой и самозащитной проволокой, ав-

томатической сварке под слоем флюса кратеры заполняются шлаком, что приводит к появлению шлаковых включений в шве.

Очевидно, что вероятность возникновения дефектов сварки может быть оценена долей отклонения параметров технологии от нормы. Как следует из изложенного, возникновение скрытых дефектов в многопроходном шве определяется изменением энергетических параметров процесса сварки, в том числе количеством обрывов дуги, а также трудно контролируемые параметрами поперечных колебаний горелки.

При сварочных работах на потенциально опасных объектах, к которым относятся магистральные трубопроводы, в онлайн-режиме выполняют мониторинг и документирование реализуемых процессов сварки [13, 14]. Обрывы дуги и короткие замыкания можно легко определять при мониторинге процессов сварки и документирования значений тока и напряжения дуги (рис. 4, см. обложку).

Если при сварке длинной дугой короткие замыкания являются критерием нарушения стабильности процесса сварки, то при сварке с короткими замыканиями, наоборот, их отсутствие свидетельствует о вероятности возникновения дефектов.

Более сложной задачей является контроль текущих значений размаха и периода поперечных колебаний сварочной горелки. Эта проблема может быть решена, если использовать уже имеющийся опыт создания систем автоматического направления электрода по стыку, когда в качестве источника информации о положении стыка использовали сварочную дугу [15, 16]. Здесь основой является контроль сдвига фазы тока и напряжения дуги в диапазоне частот 0,2...5 Гц, типичных для поперечных колебаний (рис. 5, см. обложку).

Использование сварочной дуги в качестве датчика параметров колебаний горелки в стыке предполагает разработку специального алгоритма для анализа гармоник тока и напряжения сварки для определения частоты и размаха колебаний электрода. Такой алгоритм обработки сигналов более сложен в реализации, но более надежен и информативен, чем лазерное сканирование. Однако для его использования, помимо фиксации выхода тока и напряжения дуги за установленные пределы, существующие системы мониторинга должны быть дополнены специальным интеллектуальным модулем для анализа данных и прогнозирования вероятности возникновения характерных дефектов сварных швов.

Для оперативного прогнозирования интеллектуальный модуль должен в онлайн-режиме проводить анализ не только осциллограмм тока и напряжения дуги, выявлять обрывы и короткие замыкания, но и определять отклонения параметров поперечных колебаний электрода и на основании этих данных проводить оценку их влияния на формирование сварочной ванны и шва. Эта задача может быть решена на основе физико-математического моделирования явлений, приводящих к возникновению дефектов шва.

Практическая реализация такого инновационного решения полностью соответствует тенденциям цифровой эпохи [17].

Выводы

1. Выполнен анализ причин возникновения внутренних дефектов формирования швов, которые доминируют при многопроходной дуговой сварке стыков магистральных трубопроводов.

2. Основной причиной возникновения внутренних дефектов формирования швов являются кратеры на поверхности предшествующих проходов, возникающие при обрывах дуги и при некорректных амплитуде и периоде поперечных колебаний горелки, которые трудно контролировать при ручной и механизированной дуговой сварке.

3. Для устранения недостатка существующих систем мониторинга, которые не прогнозируют возникновение дефектов сварки, необходимо разработать физико-математическую модель процесса орбитальной сварки магистральных трубопроводов, количественно связывающую данные мониторинга и параметры сварочного процесса с вероятностью возникновения характерных дефектов.

4. Для совершенствования систем мониторинга и документирования, контролирующих ток и напряжение дуги, они должны быть дополнены подсистемами оценки параметров поперечных колебаний электрода и прогнозирования возможности возникновения дефектов сварных швов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Селуянов А.А., Шутов Н.В. Предприятия добычи, транспортировки и переработки углеводородного сырья, как объекты повышенной опасности // Нефтегазовое дело. 2013. Т. 11. № 2. С. 137–143.

2. Идрисов Р.Х., Идрисова К.Р., Кормакова Д.С. Анализ аварийности магистральных трубопроводов России // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2019. № 2. С. 44–46.

3. Гайсина Д.Р., Денисова Я.В. Анализ причин аварийных ситуаций на магистральных трубопроводах // Вестник Казанского технологического университета. 2016. Т. 19. № 14. С. 129–130.

4. Анализ основных причин аварий, произошедших на магистральных газопроводах / С.В. Савонин, А.В. Москаленко, А.В. Тюндер и др. // Нефть и газ Сибири. 2015. № 4 (21). С. 4–6.

5. Рыбин В.А., Иванов В.А. Проблемы повышения энерго- и ресурсоэффективности при сооружении и реконструкции магистральных трубопроводов // Экспозиция Нефть Газ. 2013. № 7 (32). С. 60–62.

6. Шипилов А.В., Полосков С.И. Технология комбинированной орбитальной сварки трубопроводов плавящимся электродом // Глобальный научный потенциал. 2010. № 6. С. 19–20.

7. Алешин Н.П., Щербинский В.Г. Контроль качества сварочных работ. М.: Высшая школа, 1986. 167 с.

8. Liu C., Bhole S.D. Challenges and developments in pipeline weldability and mechanical properties // Science and Technology of Welding and Joining. 2013. Vol. 18. No. 2. P. 169–181.

9. Рыбаков А.А., Филипчук Т.Н., Гончаренко Л.В. Трещины в сварных соединениях труб большого диаметра и меры их предупреждения // Автоматическая сварка. 2013. № 4. С. 16–22.

10. Денисов Л.С. Контроль и управление качеством сварочных работ. Минск: Высшая школа, 2016. 624 с.

11. Ерофеев В.А. Прогнозирование качества электронно-лучевой и лазерной сварки на основе компьютерного моделирования. Тула: ТулГУ, 2002. 140 с.

12. Cho D-W. Algorithms of mathematical models for fast multi-pass weld-bead drawing technique in V-groove welding // Journal of Mechanical Science and Technology. 2019. Vol. 33. No. 11. P. 5347–5352.

13. Online welding quality monitoring based on feature extraction of arc voltage signal / Z. Zhang, H. Chen, J. Zhong, S. Chen // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014. Vol. 70. No. 9–12. P. 1661–1671.

14. Филяков А.Е., Шолохов М.А. Пути решения проблем оперативного прогнозирования качества сварных соединений магистральных трубопроводов // Вестник ДГТУ. 2020. Т. 20. № 1. С. 42–50.

15. Шолохов М.А., Ерофеев В.А., Полосков С.И. Система коррекции положения плавящегося электрода с использованием дуги в качестве датчика для автоматической сварки продольных швов по узкому зазору // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 8. С. 7–10.

16. Baek D., Moon H.S., Park S-H. Development of an automatic orbital welding system with robust weaving width control and a seam-tracking function for narrow grooves // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. Vol. 93. No. 1–4. P. 767–777.

17. Полосков С.С., Желтенков А.В., Сюзева О.В. Инновационная деятельность высокотехнологичных наукоемких предприятий в цифровую эпоху // Материалы междунар. науч.-практ. конф. "Устойчивое и инновационное развитие в цифровую эпоху". М.: МГУ, 2019. С. 358–366.

Алексей Евгеньевич Филяков,
filyakov.92@mail.ru

С.В. Михайлицын, М.А. Шекшеев, А.Б. Сычков, А.Н. Емелюшин
(Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова)

Разработка самозащитной порошковой проволоки диаметром 1,6 мм для автоматической сварки корня шва стыков трубопроводов

Приведены результаты исследования самозащитной порошковой проволоки диаметром 1,6 мм. Цель работы — создание порошковой проволоки малого сечения и технологии ее изготовления, предназначенной для автоматической сварки корневого слоя шва неповоротных стыков магистральных трубопроводов, транспортирующих нефть и газ с примесью сероводорода, и обеспечивающей повышение не менее чем в 1,5 раза производительности процесса сварки труб. Разработаны формирующие ролики для исходной заготовки диаметром 2,4 мм двухзагибной порошковой проволоки. Определен состав шихты порошковой проволоки, обеспечивающий выполнение требований к разрабатываемой продукции: надежное проплавление корневого слоя шва неповоротных стыков трубопроводов с пределом прочности металла сварного шва на уровне 490 МПа. Разработаны рекомендации по технологии производства самозащитной порошковой проволоки двухзагибной конструкции.

Ключевые слова: порошковая проволока; наполнитель; коэффициент заполнения; волочение; сварка; сварной шов; корневой шов.

The results of self-protective powder wire with diameter of 1.6 mm are presented. The working purpose is to create small-section powder wire and its manufacturing technology, designed for automatic welding of the root layer of the seam of non-rotating joints of main pipe-lines transporting oil and gas with admixture of hydrogen sulfide, and providing increase of at least 1.5 times the productivity of pipe welding. The forming rollers for the initial billet with diameter of 2.4 mm of two-bend powder wire are developed. The composition of the charge flux-cored wire, providing the requirements of product development: reliable penetration of the root layer of the seam fixed joints of pipe-lines with tensile strength of the weld metal at 490 MPa. Recommendations on the production technology of self-protective powder wire of two-bend design are developed.

Keywords: cored wire; filler; fill factor; drawing; welding; weld; root weld.

При сооружении магистральных нефте- и газопроводов одним из основных технологических процессов, определяющих темп строительства и надежность конструкции, является сварка труб [1, 2]. В целом темп строительства магистрального трубопровода определяется скоростью сварки корневого слоя шва неповоротных стыков в трассовых условиях. При этом важно обеспечивать проплавление корневого слоя шва с образованием плавного обратного валика, что гарантирует высокое качество стыкового шва. Скорость дуговой сварки наиболее высокая при сварке сверху вниз в вертикальном положении.

Широко и успешно применяют высокопроизводительные способы сварки труб в длинномерные секции на специализированных трубосварочных базах [3]. Для сварки поворотных стыков используют сварку в среде защитных газов. При этом ослабление корневого слоя шва не допускается. Однако вы-

пускаемые в настоящее время отечественной промышленностью порошковые проволоки не обеспечивают высокопроизводительной сварки с повышенными требованиями, которые предъявляются к корневому слою шва магистральных трубопроводов при сварке во всех пространственных положениях, в том числе сварки сверху вниз с образованием обратного валика и без дополнительной защиты зоны сварки от влияния окружающей среды.

Для сварки секций в нитку, в трассовых условиях, разработаны различные автоматические комплексы, выполняющие заполняющие слои кольцевых швов, как правило, снизу вверх. Поэтому корневой слой шва неповоротных стыков до сих пор выполняют ручной дуговой сваркой, что значительно снижает производительность в целом [4, 5]. Обязательная смена каждого сгоревшего электрода новым резко снижает темп ручной дуговой сварки по сравнению с механизированной сваркой

порошковой проволокой. Огарки каждого электрода длиной до 50 мм идут в безвозвратные потери. Сварка порошковой проволокой обеспечивает непрерывность процесса сварки корневого слоя шва.

Повышение производительности сварки корневого слоя шва может быть достигнуто в результате механизации сварки порошковой проволокой.

Цель работы — создание самозащитной порошковой проволоки малого сечения и технологии ее изготовления для автоматической сварки корневого слоя шва неповоротных стыков магистральных трубопроводов, обеспечивающей надежное проплавление кромок свариваемых труб с образованием обратного валика.

Замена ручной дуговой сварки на механизированную позволит не менее чем в 1,5 раза увеличить темп сварки корневого слоя шва за счет непрерывности процесса сварки, а также применения более узкой разделки кромок. Также это позволит уменьшить число сварщиков и частично или полностью механизировать их труд.

К самозащитной порошковой проволоке предъявляется ряд требований, от выполнения которых зависит возможность ее применения: обеспечение высокой производительности процесса; широкий диапазон режимов сварки; хорошее формирование шва и отделимость шлаковой корки; малые потери на разбрызгивание; высокие механические свойства металла шва. Помимо этого, проволока должна быть технологичной в изготовлении. Общим требованием является обеспечение равномерности плавления сердечника и оболочки.

Порошковая проволока трубчатой конструкции не позволяет при сварке достичь хорошей защиты металла шва вследствие ограничения количества газообразующих материалов, вводимых в сердечник, и их неблагоприятного расположения по отношению к металлической оболочке. Поэтому ее, как правило, в качестве самозащитной не применяют. Введение части оболочки внутрь сердечника обеспечивает более равномерное его плавление и более эффективную защиту металла от воздуха. Для самозащитной порошковой проволоки целесообразно применять сложные конструкции сечения, в основном двухзагибные.

Металлургические процессы при сварке открытой дугой порошковой проволокой опре-

деляются композицией сердечника, которая должна обеспечивать сочетание защитных свойств и благоприятные сварочно-технологические свойства и механические характеристики металла шва [6, 7].

Для разрабатываемой самозащитной порошковой проволоки была выбрана двухзагибная конструкция, с подгибом внутрь двух кромок. Исходили из следующих условий:

— сечение порошковой проволоки должно быть сложным с введением части оболочки в сердечник;

— проволока должна быть технологичной в изготовлении, не затруднять процесса дозирования шихтой и волочения на готовый размер.

В качестве исходных материалов использовали ленту холоднокатаную из низкоуглеродистой стали по ГОСТ 503—81 сечением $0,3 \times 10$ мм и шихту, содержащую основные компоненты самозащитной порошковой проволоки, с насыпной массой в уплотненном состоянии $14,2...26,3$ кг/м² и с гранулометрическим составом $0,063...0,3$ мм.

Схема профилирования стальной ленты в исходную заготовку порошковой проволоки двухзагибной конструкции приведена на рис. 1.

Исходный диаметр порошковой проволоки 2,8 мм. Коэффициент заполнения проволоки наполнителем, при котором достигалось максимально возможное заполнение и сохранялось устойчивое без обрывов волочение, равен $19...25$ % в зависимости от насыпной массы шихты.

Суммарное обжатие при волочении проволоки составляло 68 %, частные обжатия по маршруту волочения до диаметра 1,6 мм: 7; 14; 26; 18; 17 и 17 %.

В порошковой проволоке двухзагибной конструкции на первых протяжках наблюдали менее интенсивную пластическую деформацию стальной оболочки по сравнению с трубчатой, что вызвано более длительным уплотнением шихты. Уменьшение диаметра проволоки происходит не за счет снижения толщины стенки, а в результате изменения размера профиля. Коэффициент вытяжки равен 2.

Суммарная сила профилирования исходной заготовки имела значение, близкое разрывной силе ленты, равной 106 Н для сечения $0,3 \times 10$ мм, поэтому проволоку изготовляли без омыливания ее на первом барабане.

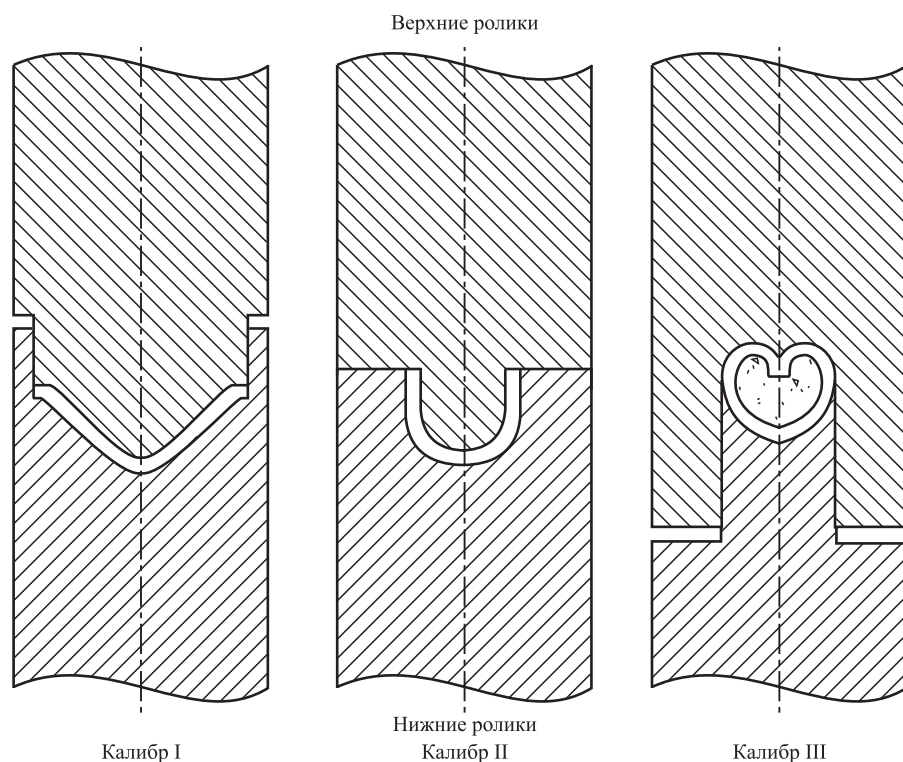


Рис. 1. Схема профилирования стальной ленты в исходную заготовку порошковой проволоки двухзагибной конструкции

Наблюдаемое последующее снижение силы волочения было вызвано уплотнением шихты при отсутствии деформации оболочки. При завершении уплотнения шихты начинается вытяжка проволоки, что вызывает резкое повышение, а затем постепенное снижение нагрузок.

Для сердечника самозащитной порошковой проволоки применяли следующие компоненты: мрамор, плавиковый шпат, ферромарганец, гематит, тальк, крахмал, рутиловый концентрат, криолит, натрий кремнефтористый полиэтилен, натриевую силикатную глыбу, железный порошок. Кусковые материалы (мрамор, гематит, плавиковый шпат, ферромарганец) дробили в щековой дробилке, размер кусков на выходе 2...12 мм. Кусковые материалы (мрамор, гематит, плавиковый шпат, натриевая силикатная глыба) размалывали в шаровой мельнице. Ферромарганец размалывали с добавлением инертной добавки (6 %) в шаровой мельнице периодического действия. Остальные компоненты применяли в состоянии поставки.

Мрамор, плавиковый шпат, гематит, рутиловый концентрат сушили при температуре 650...700 °С до влажности 0,1 %.

Дозировали шихту вручную, смешивали в сухом смесителе типа "пьяная бочка".

Порошковую проволоку изготавливали на линии в составе размоточного устройства с лентой, профилегибочного устройства с ленточным питателем и волочильного стана с моталкой непрерывного съема проволоки в мотках.

Маршрут волочения представлен в табл. 1.

Разработанная самозащитная порошковая проволока должна обеспечивать качественную автоматическую сварку неповоротных стыков труб диаметром 530...1420 мм со следующими характеристиками: предел прочности металла шва на уровне 490 МПа; относительное удлинение 20 %; ударная вязкость КСУ не менее 130 Дж/см².

Особые условия эксплуатации: разработанную порошковую проволоку можно применять для сварки труб, транспортирующих нефть и газ с примесью сероводорода в южной климатической зоне.

В процессе изготовления порошковой проволоки проверяли основные технологические параметры: насыпную массу шихты, коэффициент заполнения проволоки наполнителем, качество поверхности и диаметр проволоки. Сварочно-технологические испытания порошковой проволоки проводили при сварке кольцевых швов во всех пространственных

1. Маршрут волочения самозащитной порошковой проволоки диаметром 1,6 мм

Номер барабана стана	Маршрут волочения, мм	Сила протяжки, Н	Частная вытяжка проволоки между барабанами
1	2,3	700...750	1,13
2	2,04	470...530	1,15
3	1,76	540...580	1,35
4	1,59	420...460	1,15
5	1,47	350...400	1,16
6	1,38	300...330	

2. Химический состав наплавленного металла, %

C	Mn	Si	P	S
0,136	0,7	0,1	0,021	0,019

положениях при следующих режимах сварки: сварочный ток 140...220 А; напряжение дуги 24...32 В; скорость сварки 12...20 м/ч.

Наилучшие результаты при испытаниях показала порошковая проволока, сердечник которой состоял из мрамора, рутилового концентрата, талька, натриевой силикатной глыбы, ферромарганца, полиэтилена, железного порошка.

При сварке данной порошковой проволокой было обеспечено стабильное проплавление с образованием обратного валика в нижнем, горизонтальном, вертикальном, потолочном и полупотолочном положениях. В вертикальном и полупотолочном положениях более предпочтительна сварка "на спуск".

Химический состав металла, полученный с применением разработанной проволокой представлен в табл. 2. В металле отсутствуют поры и шлаковые включения. Структура металла характеризуется наличием видманшеттового феррита, иглы которого прорастают от периферии зерна к его центру (рис. 2).

Механические свойства металла шва, сваренного разработанной порошковой проволокой: предел прочности 520 МПа; предел текучести 440 МПа; относительное удлинение 24 %; ударная вязкость KCU 142 Дж/см²; угол изгиба 180°.

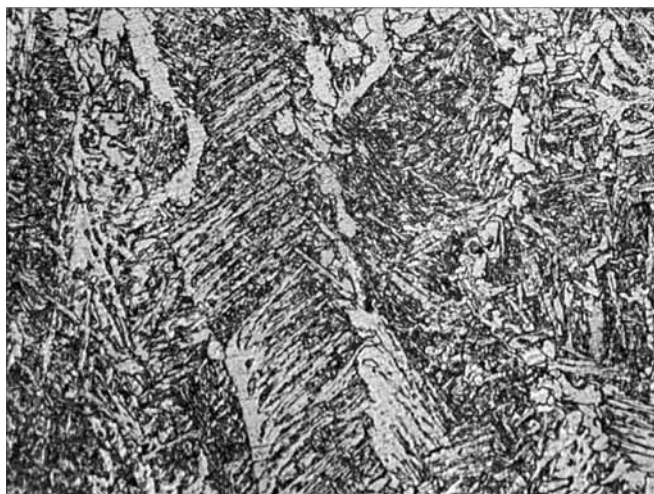


Рис. 2. Структура металла, наплавленного порошковой проволокой. $\times 200$

Выводы

1. Разработан состав самозащитной порошковой проволоки диаметром 1,6 мм для автоматической сварки корневого слоя шва неповоротных стыков магистральных трубопроводов, транспортирующих нефть и газ с примесью сероводорода.

2. Разработана калибровка формирующих роликов для профилирования проволоки заготовки порошковой проволоки двухзагибной конструкции с исходным диаметром 2,4 мм.

3. Разработана технология изготовления двухзагибной самозащитной порошковой проволоки.

4. Использование разработанной порошковой проволоки позволяет в 1,5 раза повысить производительность сварки корневого шва магистральных трубопроводов, уменьшить число сварщиков, механизировать их труд.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Исследование** свариваемости высокопрочной трубной стали класса прочности K56 / А.Н. Емелюшин, А.Б. Сычков и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. № 3 (39). С. 26—30.
2. **Электроды** для ручной дуговой сварки в нефтегазовом комплексе / И.Н. Зверева, А.Д. Картунов и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия "Металлургия". 2015. Т. 15. № 1. С. 92—95.
3. **Автоматическая** сварка самозащитной порошковой проволокой. Преимущества процесса / Н.Г. Блехерова, В.В. Прохоров и др. // Нефть. Газ. Новации. 2012. № 9 (164). С. 34—37.
4. **Материалы** для сварки, наплавки, пайки и напыления: учеб. пособие / С.В. Михайлицын, М.А. Шекшеев и др. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2016. 207 с.
5. **Проектирование** сварочных электродов для нефтегазового комплекса / С.В. Михайлицын, И.Н. Зверева и др. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. 196 с.
6. **Автоматическая** сварка неповоротных кольцевых стыковых соединений толстостенных труб большого диаметра с применением самозащитных порошковых проволок / В.А. Галкин, Б.Л. Гецкин // Наука и техника в газовой промышленности. 2009. № 4 (40). С. 105—110.
7. **Совершенствование** производства и улучшения качества сварочных материалов / С.В. Михайлицын, Г.А. Салехова // Сталь. 1991. № 11. С. 55—57.

*Сергей Васильевич Михайлицын, канд. техн. наук,
svmikhaylitsyn@mail.ru;
Максим Александрович Шекшеев, канд. техн. наук;
Александр Борисович Сычков, д-р техн. наук;
Алексей Николаевич Емелюшин, д-р техн. наук*



УДК 621.777:669.71:004.94

DOI: 10.36652/1684-1107-2020-18-8-353-358

А.И. Дмитрюк (Концерн "Росэнергоатом", Ленинградская АЭС, г. Сосновый бор),
А.А. Григорьев (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого)

Совершенствование технологии прессования алюминиевых заготовок

Предложен алгоритм расчета энергосиловых параметров (сила, мощность, скорость) процесса прессования полуфабрикатов из алюминиевого порошка. Исходными параметрами для расчетов являются характеристики материала, геометрические и скоростные параметры процесса. Разработанный алгоритм позволяет рассчитать и снизить отрицательный эффект нестабильности технологического процесса, особенно на начальном этапе прессования, и уменьшить неравномерность свойств получаемых прутков за счет применения систем автоматизации.

Ключевые слова: технология прессования; алюминий; порошковая металлургия; математическое моделирование процессов; эксплуатационные свойства.

Algorithm for the calculating of the power parameters (force, power, speed) of the extrusion process of semi-finished products from aluminium powder is proposed. The initial parameters for the calculations are material characteristics, geometric and speed parameters of the extrusion process. The developed algorithm allows to calculate and reduce the negative effect of process instability, especially at the initial stage of extrusion, and to reduce properties inhomogeneous of the producing bars through the use of automation systems.

Keywords: extrusion technology; aluminium; powder metallurgy; mathematical modeling of processes; performance characteristics.

Эффективность реализации программ развития машиностроения в значительной степени определяется созданием и внедрением новых материалов и технологий, в том числе порошковой металлургии [1–3]. При получении и обработке порошковых и наноматериалов структурные и физико-химические изменения происходят в них на уровне, сопоставимом с размерами отдельных молекул, что обеспечивает высокие технологические и эксплуатационные свойства [4–6]. Обычно в технологическую схему порошковой металлургии включены операции интенсивной деформации [7–8]: прессования, выдавливания, прокатки, штамповки и т.д. При этом происходят уплотнение [9–10] и компактирование материала при высоких температурах и степенях деформации [11–12].

Для проведения экспериментов и изготовления ограниченных партий деталей машин из таких материалов возможно применять стандартное оборудование для деформирования традиционных литых материалов. Однако

при внедрении в серийное производство высокие прочностные свойства деформируемых материалов вызывают ряд технологических проблем и требуют использования специализированного оборудования и оснастки, позволяющих обрабатывать материалы с наибольшей экономической эффективностью [13]. В этих условиях для снижения себестоимости машиностроительной продукции необходимо заранее определить требуемые параметры оборудования, применяемого в технологическом процессе изготовления деталей и полуфабрикатов.

Цель исследования — разработка алгоритма расчета силы пуансона при прессовании алюминиевых полуфабрикатов и сравнение результатов, рассчитанных теоретически и полученных экспериментально.

Методика моделирования и проведения исследований. При оптимизации процесса прессования порошков наиболее важным является исследование первого пика роста напряжений, вызываемого большой силой среза в начале технологического процесса. Резуль-

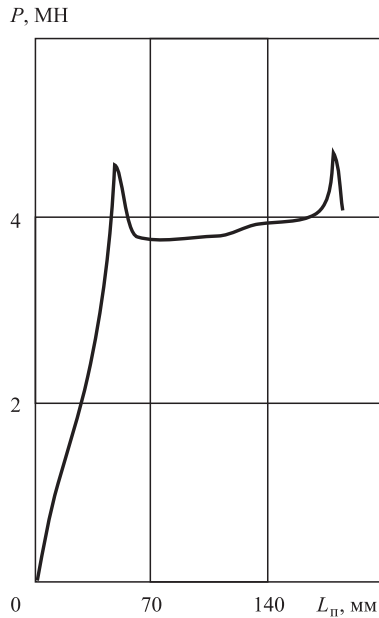


Рис. 1. Общий вид кривой зависимости силы прессования P от хода пуансона $L_{п}$

таты исследования процесса прессования при высоких температурах показали, что типичная кривая зависимости силы от хода пуансона имеет два характерных пика (рис. 1).

Исследование и предварительное моделирование величин этих пиков являются наиболее актуальными, так как соответствующие пикам максимальные силы определяют выбор деформирующего оборудования, а именно: мощность пресса, которая является основным параметром деформирующих прессов, и величину пресс-остатка, зависящую от конечного давления.

При прессовании алюминия и его сплавов обычно применяют плоские матрицы (фильеры), что объясняется большой склонностью алюминия к налипанию. В этом случае предварительный расчет требуемой силы прессования позволяет уменьшить пресс-остаток и, соответственно, повысить коэффициент использования материала за счет рационального выбора силы пресса.

Наличие первого пика на кривой зависимости силы от хода пуансона объясняется рядом причин:

- переход от контактного трения покоя к трению скольжения, сопровождающемуся снижением силы прессования;

- формирование "мертвых зон" выдавливаемого материала и его срез по границам этих зон, требующий дополнительных затрат энергии прессования;

- более равномерное по сравнению с начальной стадией распределение смазки по всей поверхности скольжения и вовлечение смазки на поверхность раздела упругой и пластической зон;

- холодное упрочнение прессуемого материала с дальнейшим тепловым эффектом деформации, снижающим сопротивление деформации;

- градиент температур по стенке матрицы;

- изменение схемы деформации: в начале — осадка цилиндрической заготовки и затем — выдавливание; при этом изменяются степень и скорость деформации.

Второй пик непосредственно связан с изменением схемы деформации и соответствует "мертвой зоне" материала. При использовании фильер застойные (мертвые) зоны материала образуются в углах между матрицей и контейнером. При достижении пуансоном такой застойной зоны она сокращается, что приводит к уменьшению угла скольжения выдавливаемого материала по материалу "мертвой зоны" (рис. 2).

При моделировании процессов прессования (выдавливания) материалов в холодном и горячем состояниях, как правило, используют сложный, громоздкий математический аппарат, анализирующий схемы напряженного состояния и не позволяющий в ряде случаев точно учитывать физико-механические характеристики материала. Однако они в значительной степени определяют зависимость сопротивления деформации от измеряемых при горячем прессовании технологических параметров: температуры, степени и скорости деформации. Результаты таких теоретических исследований имеют плохую сходимость с результатами экспериментов. По этой причине возникает необходимость использования некоторых эмпирических коэффициентов.

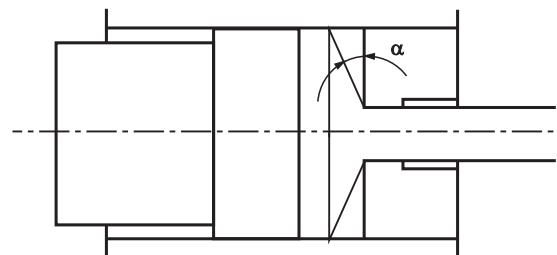


Рис. 2. Уменьшение угла скольжения выдавливаемого материала по материалу "мертвой зоны" при достижении ее пресс-шайбой

Также сложные модели трудно использовать для прогнозирования параметров прессования в конкретных промышленных условиях.

Таким образом, необходимо создать математическую модель, описывающую типичную кривую прессования (выдавливания) порошковой (пористой) заготовки и основанной на аппроксимации участков подобной экспериментальной кривой классическими зависимостями, описывающими процессы, соответствующие участкам этой кривой.

Для рассмотрения и описания процессов при выдавливании, учитывая вид типичной зависимости "сила—ход пуансона", ход пуансона условно разделен на три участка: 1 — осадка со стартовым пиком; 2 — установившийся этап (стабильное прессование); 3 — конечный этап (нестабильное прессование).

Результаты исследований и их обсуждение.

1-й участок: осадка со стартовым пиком. На этом участке начинается осадка заготовки. Диаметр заготовки D_b изменяется от исходного значения до внешнего диаметра матрицы D_a (рис. 3). Для пористой заготовки можно предположить, что на 1-м этапе происходит изменение пористости от исходной до практически нулевой с дальнейшей деформацией материала как компактного.

Силу на штампе рассчитывают по формуле

$$P_{kd} = \frac{\sigma_s p D_b^2}{4}, \quad (1)$$

где σ_s — сопротивление деформации; p — внешняя приложенная сила.

Сопротивление деформации σ_s является функцией температуры, вытяжки и скорости деформации. В данном случае значение этой

величины взято на основе литературных данных [14]. В расчетах использованы экспериментальные данные для простой схемы напряженного состояния — осадки.

Ход 1-го этапа (длина участка, мм) рассчитан в предположении, что он заканчивается при заполнении заготовкой всего объема блока от пуансона до матрицы и пористость заготовки достигает значения пористости компактного материала:

$$\frac{L_b D_b^2 \theta}{4} = \frac{L D_a^2 \pi}{4}, \quad (2)$$

откуда

$$L = L_b \frac{D_b^2 \theta}{D_a^2 \pi}, \quad (3)$$

где L_b — длина заготовки; L — длина заготовки при окончании 1-го этапа прессования; θ — относительная плотность заготовки до начала прессования.

Ход осадки:

$$T = L_b - L = L_b - L_b \frac{D_b^2 \theta}{D_a^2 \pi}. \quad (4)$$

Стартовая сила. Предполагается, что на резкое повышение силы прессования (образование пика) оказывают влияние следующие составляющие: сила, расходуемая на деформирование объема материала P_{kd} ; сила трения о стенки контейнера P_{kr} ; сила на срез по границам зоны застоя P_{ks} . При этом срез происходит под углом 45° . Этот угол является для прохождения среза оптимальным, что подтверждается предварительными расчетами, которые были выполнены путем построения зависимости силы от угла среза. Формируется

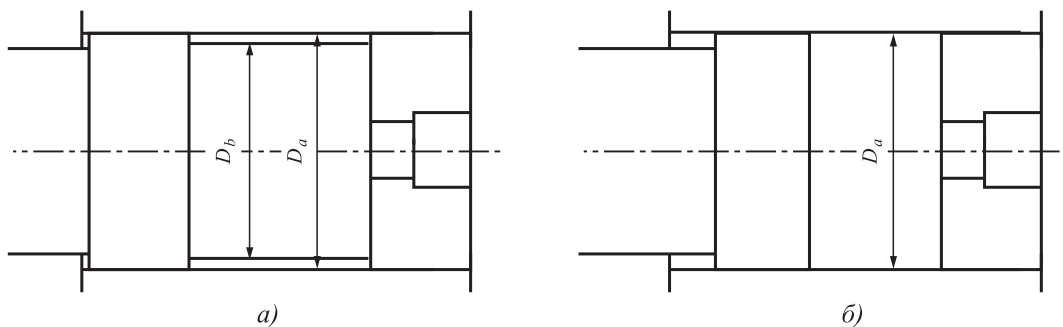


Рис. 3. Первый этап прессования: распрессовка и осадка заготовки до начала истечения материала через матрицу:

a — $D_b < D_a$; b — объем блока заполнен материалом заготовки. Пористость заготовки близка к пористости компактного материала

зона застоя. После начального этапа происходит проникновение смазки со стенок контейнера в пространство между материалом и зоной застоя.

Расчет стартовой силы:

$$P_{sd} = P_{kd} + P_{kr} + P_{ks}, \quad (5)$$

где

$$P_{kd} = \frac{\sigma_s \pi D_a^2}{4}; \quad (6)$$

$$P_{kr} = \sigma_s \psi_k F_a; \quad (7)$$

$$P_{ks} = \frac{\sigma_s \cdot \sqrt{3}}{2F}, \quad (8)$$

где ψ_k — коэффициент трения, в настоящей модели принят равным коэффициенту трения скольжения на протяжении всего процесса, за исключением пикового участка, где происходит предполагаемый срез материала и $\psi_k = 1$; F_a — площадь поверхности трения материала о стенки контейнера:

$$F_a = \pi D_a (T_1 - T_2), \quad (9)$$

где T_1 — координата хода пуансона, соответствующая концу 1-го этапа прессования (осадка + допрессовка); T_2 — координата пуансона, соответствующая началу этапа деформации "мертвой зоны", т.е. T_2 — длина "мертвого угла", равная при его значении 45° :

$$T_2 = \frac{(D_a - D_m)}{2}; \quad (10)$$

$\sigma_s \cdot \sqrt{3}/2$ — напряжение среза; F — площадь поверхности среза по "мертвой зоне".

Поверхность среза представляет собой боковую поверхность усеченного прямого кругового конуса. Площадь этой поверхности:

$$F = \frac{\rho (D_a^2 - D_m^2)}{4 \cos \alpha}, \quad (11)$$

где α — угол "мертвой зоны"; D_m — внутренний диаметр матрицы (очка).

Напряжение среза на поверхности "мертвой зоны":

$$\tau_s = \frac{\sigma_s \cdot \sqrt{3}}{2 \sin \alpha}. \quad (12)$$

В итоге:

$$P_{ks} = \frac{\sigma_s \psi_k \pi \cdot \sqrt{3} (D_a^2 - D_m^2)}{2 \cos \alpha \cdot 8 \sin \alpha}. \quad (13)$$

2-й участок: установившийся процесс прессования. Как было отмечено выше, на 2-м этапе происходит истечение материала через отверстие матрицы. При этом происходит снижение силы прессования за счет уменьшения поверхности трения о стенки контейнера. Силу прессования вычисляют, как и на начальном этапе, но коэффициент трения равен не единице (так как считается, что предполагаемый срез материала закончился), а значению коэффициента трения при установившемся процессе скольжения. Этот этап рассчитывается и описывается на протяжении хода пуансона до координаты T_2 , при достижении которой начинается деформация материала "мертвой зоны".

3-й участок: конечный этап прессования — формирование пресс-остатка. На 3-м этапе прессования пуансон достигает начала зоны застоя, при этом принимают, что схема деформации будет происходить так, как показано на рис. 2. Это приводит к значительному возрастанию требуемой силы прессования. Несмотря на некоторое уменьшение площади трения по поверхности зон застоя, происходит увеличение составляющей выдавливания P_{ks} из-за резкого повышения угла скольжения.

Конечная сила:

$$P_{ek} = P_{kd} + P_{ks}, \quad (14)$$

где P_{ks} рассчитывают по формуле (10), но необходимо учитывать уменьшение угла "мертвой зоны":

$$\alpha = a \operatorname{tg} a, \text{ где } a = \frac{w}{0,5(D_a - D_m)}, \quad (15)$$

где w — координата хода пуансона, которая изменяется от T_2 до T_{pr} — величины заданного пресс-остатка.

Программа для расчета силы при прессовании составлена с учетом всех описанных выше предполагаемых зависимостей. Принцип использования состоит в задании запрашиваемых параметров пресс-оснастки и прессования. Результатом расчета является выводимый на экран график предполагаемой зависимости

"сила прессования—ход пуансона". Диаметр блока в программе не подлежит варьированию и принят равным 110 мм. Также не введено никаких ограничений по уровням вводимых параметров, что предполагает работу с программой пользователя, имеющего представление об описываемом процессе.

Сравнение экспериментальной и теоретической зависимостей силы прессования от хода пуансона. Расчетные и экспериментальные результаты сравнивали для зависимости силы прессования цилиндрических порошковых заготовок сплава $AlSi_{18}CuMgNi$ диаметром 107,6 мм и длиной 220 мм. Использовали следующие технологические параметры: диаметр пресс-блока 110 мм; диаметр матрицы 30 мм; величина пресс-остатка 20 мм; температура прессования 420 °С; скорость прессования 2 см/с.

В результате экспериментов получена диаграмма прессования в координатах "сила прессования—ход пуансона". Такие же технологические параметры процесса прессования были использованы для построения его математической модели. Для выполнения программы требуется введение величины сопротивления деформации, зависящей от скорости и температуры прессования. Эта величина была выбрана на основании экспериментальных данных, полученных в [15], и для порошкового сплава $AlSi_{18}CuMgNi$ составляет 240 МПа (для перечисленных выше параметров).

Представляет сложность выбор коэффициента трения. Поскольку не существует четких зависимостей и рекомендаций для выбора этой величины с учетом всех параметров прессования, она была рассчитана по значениям силы 2-го участка экспериментальной кривой прессования по принятой в модели зависимости, описывающей этот участок. Для выбранных условий прессования коэффициент трения равен 0,17.

На рис. 4 приведены экспериментальная и смоделированная зависимости с учетом среза на начальной стадии прессования.

При сопоставлении зависимостей силы прессования от хода пуансона, полученных экспериментально и с использованием моделирования, выявлено их хорошее соответствие. Наибольший интерес представляет совпадение абсолютных значений силы на начальном этапе прессования. Это свиде-

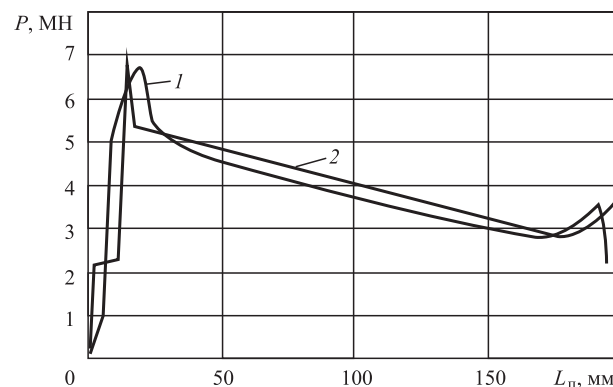


Рис. 4. Сравнение экспериментальной (1) и рассчитанной по предлагаемой модели (2) зависимостей силы прессования материала при горячем прессовании порошкового сплава $AlSi_{18}CuMgNi$

тельствует о правомерности предположения причины наличия стартового пика вследствие образования "мертвой зоны", а также подтверждает адекватность разработанной модели.

Заключение. На примере алюминиевого сплава разработан алгоритм расчета изменения силы в процессе прессования порошковых заготовок и подтверждена адекватность предлагаемой модели.

Исходными параметрами для расчетов являются характеристики материала (насыпная плотность, размеры исходной заготовки, степень деформации, сопротивление деформации в зависимости от скорости деформации и температуры), а также геометрические и скоростные параметры процесса (вид прессования, размеры прессовой оснастки, размеры матрицы, коэффициент трения, скорость движения пресс-блока).

Алгоритм позволяет предварительно рассчитать энергосиловые параметры процесса прессования материала (силу, мощность, скорость), что является основой для обоснованного выбора оборудования, необходимого для промышленной реализации технологического процесса изготовления изделий.

Предложенный алгоритм позволяет рассчитать наличие нестационарных участков прессования и уменьшить их влияние за счет повышения стабильности процесса и, соответственно, достижения большей однородности эксплуатационных свойств изготавливаемых изделий при применении систем автоматизации (стабилизирующих систем скорость—сила) с соответствующей регулировкой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Физические** процессы и технологии получения металлических порошков из расплава / А.И. Рудской, К.Н. Волков, С.Ю. Кондратьев, Ю.А. Соколов. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. 610 с.
2. **Соколов Ю.А., Кондратьев С.Ю., Лукьянов А.А.** Получение изделий из композиционных материалов методом электронно-лучевого синтеза и исследование их свойств // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 2. С. 35—41.
3. **Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А.** Новый подход к синтезу порошковых и композиционных материалов электронным лучом. Часть 1. Технологические особенности процесса // Металловедение и термическая обработка металлов. 2016. № 1 (727). С. 30—35.
4. **Анализ** превращений карбидных фаз в сплаве 25Cr35Ni методом количественной электронной микроскопии / С.Ю. Кондратьев, А.В. Пташник, Г.П. Анастасиади, С.Н. Петров // Металловедение и термическая обработка металлов. 2015. № 7 (721). С. 36—43.
5. **Цеменко В.Н.** Деформирование порошковых сред. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2001. 104 с.
6. **Углеродные** наноструктурные имплантаты для замещения костных дефектов и технология их изготовления / А.И. Рудской, И.М. Белов, С.К. Гордеев, О.В. Барзинский, С.Ю. Кондратьев // Металловедение и термическая обработка металлов. 2018. № 1 (751). С. 20—25.
7. **Теоретические** исследования процесса интенсивного уплотнения гетерофазных механических смесей / В.Н. Кокорин, В.И. Филимонов, А.А. Григорьев, Н.А. Сизов, А.В. Кокорин // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 11 (119). С. 3—7.
8. **Прессование** гетерофазных увлажненных железных порошков при использовании метода интенсивного уплотнения / А.И. Рудской, В.Н. Кокорин,

С.Ю. Кондратьев, В.И. Филимонов, А.В. Кокорин // Научные технологии в машиностроении. 2013. № 5 (23). С. 13—20.

9. **Рудской А.И., Григорьев А.А.** Уплотнение пористой упругопластической заготовки при обработке давлением // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1984. № 9. С. 78—82.

10. **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.

11. **Григорьев А.А.** Разработка технологии получения заготовок электродов для машин контактной сварки на основе порошковой композиции Cu_2O_3 // Металлообработка. 2009. № 4 (52). С. 32—34.

12. **Особенности** моделирования процесса послойного синтеза изделий электронным лучом / А.И. Рудской, С.Ю. Кондратьев, Ю.А. Соколов, В.Н. Копаев // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. № 11. С. 91—96.

13. **Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А.** Алгоритм и технологические процессы синтеза порошковых деталей электронным лучом в вакууме // Технология машиностроения. 2015. № 1. С. 11—16.

14. **Ганин С.В., Замоздра М.Ю., Цеменко В.Н.** Определение реологических характеристик и моделирование процесса экструзии порошковых материалов // Тезисы докладов международной научной конференции "Современные материалы и передовые производственные технологии". 2019. С. 97.

15. **Гопаев В.Г., Смагоринский М.Е., Григорьев А.А. и др.** Спеченные материалы из алюминиевых порошков / под ред. М.Е. Смагоринского. М.: Металлургия, 1993. 320 с.

Артём Игоревич Дмитрюк;

*Андрей Анатольевич Григорьев, канд. техн. наук,
zhurnal-grig.2020@yandex.ru*



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

М.А. Петров
(Московский политехнический университет)

Компьютерное моделирование процессов листовой штамповки с использованием моделей трения AutoForm и TriboForm

Рассмотрены результаты моделирования по двум моделям трения. Первая модель трения соответствует модели трения Кулона и используется по умолчанию в AutoForm. Вторая модель трения характеризует трибологическую систему заготовка—инструмент и учитывает качество обработки поверхности, ее шероховатость, количество смазочного вещества, а также эффект изменения шероховатости на поверхности поковки и применяется в модуле TriboForm. Результаты моделирования, полученные по второй модели, использованы для моделирования нескольких процессов листовой штамповки в AutoForm. Установлено, что модель трения TriboForm оказывает влияние на результаты расчетов технологических операций листовой штамповки. Данное различие зависит от сложности штампуемой геометрии изделия.

Ключевые слова: листовая штамповка; вытяжка; численное моделирование; конечно-элементный анализ; AutoForm; TriboForm; модель трения.

The results of numerical simulations with two friction models are studied. The first model corresponded the Coulomb friction model and used in AutoForm on default. The second friction model took into account the quality of surface treatment, its roughness and amount of the lubricant and the effect of the asperities' height evolution. It is used in TriboForm. The results obtained for the second friction model are used to simulate sheet metal forming processes in AutoForm. It is found that the TriboForm friction model affected the results of the drawing operation. The difference in the results increased due to bigger deformation values of the technological operation.

Keywords: sheet metal forming; drawing; numerical simulation; finite element analysis; AutoForm; TriboForm; friction model.

Введение. В практике заготовительного производства качество поверхности, выражаемое через количественную величину шероховатости поверхности, играет значительную роль. Она позволяет оценить оптические свойства поверхности, ее адгезию, скорость смачивания поверхности и коэффициент растекания смазочного вещества, качество посадки в сборочных операциях. При нанесении теплозащитных покрытий необходимо предварительно текстурировать поверхность образца для повышения адгезионных свойств ее поверхности [1].

Причина влияния качества поверхности на износ инструмента — в трибологической характеристике пары трения, или в трении между инструментом и заготовкой. При этом трение, характеризующееся искусственным параметром (коэффициент трения, фактор трения), представляет собой функциональную зависимость от силы/давления на контактной поверхности, скорости деформирования, температуры материала и других параметров.

Одним из способов снижения трения в операциях ОМД является введение в систему заготовка—инструмент *смазочных веществ* (СВ). Предположим, что поверхность имеет градиентную или переменную шероховатость, т.е. такую шероховатость, которая сильно изменяется на участке ее измерения, например, от 2 до 50 мкм. Тогда максимальный объем СВ будет располагаться между впадинами и выступами с максимальной амплитудой.

При пластическом деформировании уменьшается высота впадин и выступов и смазка, как по сообщающимся сосудам под высоким давлением, перетекает из одной полости в другую. Естественно полагать, что коэффициент трения или фактор трения также будет переменным, т.е. являться функцией по времени протекания процесса штамповки. В ОМД различают три основных вида моделей трения (рис. 1): модель сухого трения, модель жидкостного трения, или переходная модель и модель гидродинамического трения [2].

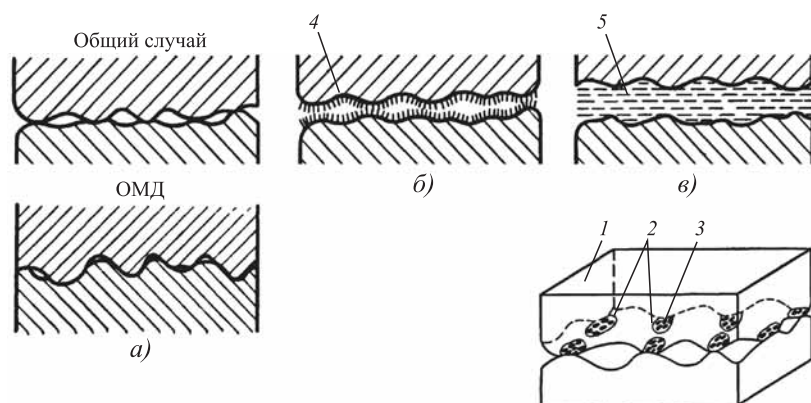


Рис. 1. Три основные модели трения по [2]:

a — сухое трение; *б* — жидкостное трение; *в* — гидродинамическое трение; 1 — номинальная контактная поверхность; 2 — область деформации в результате волнистости и точечных контактов; 3 — области действительных точечных контактов; 4 — слой смазочного вещества толщиной $\sim Ra$; 5 — слой смазочного вещества толщиной $\gg \gg Ra$

В рамках каждой из моделей может быть сформулирована частная субмодель, которая учитывает особенности физических и механических свойств материалов твердой и жидкой фаз. При выполнении листоштамповочных операций для изготовления кузовных облицовочных деталей автомобилей шероховатость оказывает наибольшее влияние. Как правило, в данном случае применяют модель второго или третьего типов. Это подтверждается и практическими экспериментами.

Установлено, что в массовом производстве кузовных деталей автомобиля при выборе вытяжки без СВ (без дефектов, низкая стойкость инструмента) и с СВ (незначительные дефекты на поверхности, в разы повышается стойкость инструмента) предпочтение отдают второму способу изготовления. Так, толщина обрабатываемого материала уменьшается и отношение (Z) толщины материала s к параметрам шероховатости (Ra , Sa) снижается на порядок.

Таким образом, геометрическая зависимость между размерами деформируемого тела (ГР) и параметрами шероховатости (Ra , Sa) взаимосвязаны, причем с уменьшением этого соотношения степень влияния шероховатости растет:

$$Z = \frac{ГР}{Ra(Sa)}. \quad (1)$$

В настоящее время в ряде областей, например, в микроэлектронике и нанотехнологиях знание топографической шероховатости является обязательным [3–5], так как толщина

обрабатываемых материалов может составлять всего 0,1 мм ($Z = 16$). При выполнении прямого моделирования деформирования материала с учетом шероховатости поверхности требуется большая расчетная мощность компьютеров, так как обрабатываются большие массивы данных по перемещениям точек впадин и вершин в пространстве, по расчету значений напряжений, деформаций, температур и т.д. [6]. Общие требования по параметрам и контролю шероховатости приведены в ISO и ГОСТ [7–10].

Эффекты, вызванные шероховатостью поверхности, проявляются

и на макроуровне, например, при операциях листовой штамповки (рис. 2, *a*, см. обложку). Существующие инструменты AutoForm слабо оценивают влияние изменения трения на растягивающие напряжения, вследствие этого не в полной мере определяют разрывы, вызванные трением или отсутствием СВ.

В работе [11] с помощью компьютерного моделирования показано, что при штамповке детали "внешняя поверхность двери" из-за высокого трения, определяемого по четырехпараметрической модели трения TriboForm, на контактных поверхностях 1 и 2 происходит разрушение материала (рис. 2, *в*, см. обложку). При штамповке пробных деталей (синяя область точек) при различных скоростях вытяжки v и с постоянным расходом СВ m (рис. 2, *б*, см. обложку) или при одинаковых скоростях и с различным количеством СВ (не показано) появляется опасность возникновения разрывов. Разрывы образуются при низких скоростях вытяжки (35 и 15 мм/с) и небольшом расходе СВ (1, 2 и 0,5 г/м²). При верификации результатов моделирования были получены натурные образцы, подтверждающие места разрушения.

Стандартная модель трения Кулона, используемая в программе AutoForm (красная область точек, см. рис. 2, *б*), показывает, что точки лежат ниже кривой предельного формоизменения. Однако модель трения TriboForm (зеленая область точек) отчетливо показывает расположение точек выше кривой предельного формоизменения, что объясняет появ-

1. Материалы исследуемых деталей и их характеристики

Кодировка детали	Материал (DIN, EN)	Толщина материала, мм	Другое обозначение материала (стандарт), дополнительное описание
I-ОС	DC03/DC04	1,5	1.0347/1.0338 (DIN, EN), 08кп/08ю (ГОСТ), холоднокатаная конструкционная углеродистая сталь
II-ШЛ	1.4541	0,5	X6CrNiTi18-10 (DIN, EN), 321 (AISI), аустенитная нержавеющая сталь
III-Ф	DC04	2,0	1.0338 (DIN, EN), 08кп (ГОСТ)
IV-СП		0,7	

ление разрывов и согласуется с результатами штамповки пробной партии деталей. Применение уточненных моделей трения в производственных целях является рациональным, поскольку помогает предотвратить возникновение нежелательного неисправимого брака на этапе отладки технологии. Далее в статье более подробно будет рассмотрена модель трения TriboForm и приведены примеры листовой штамповки, в которых обе модели трения (TriboForm и AutoForm) дают сопоставимые друг с другом результаты.

Компьютерное моделирование. Объекты исследования — листовые детали из различных машиностроительных областей (рис. 3, табл. 1): стаканчик I-ОС (сварная заготовка), колпачок II-ШЛ (штамповка из ленты, электроника), переднее крыло грузового автомобиля ЗиЛ 157К III-Ф (автомобилестроение) и скоба крепления IV-СП (строительство).

а разработку 3D-модели детали IV-СП — методом обратного проектирования, т.е. от готовой детали.

Влияние шероховатости на результат листовой штамповки устанавливали с помощью моделирования в программах TriboForm и AutoForm. Программа AutoForm позволяет учитывать трение согласно закону Кулона, в котором сила трения пропорциональна нормальной силе и коэффициенту трения, однако он не учитывает особенности топографии поверхности системы заготовка—инструмент. Программа TriboForm представляет собой программный модуль, позволяющий рассчитать коэффициент трения с учетом шероховатости инструмента и заготовки, а также расхода наносимого СВ. Далее полученное значение коэффициента трения и модель изменения шероховатости передается в программу AutoForm для расчета процесса штамповки.

Стандартная процедура постановки задачи на расчет в программе TriboForm: выбор параметров шероховатости поверхности материала ⇒ ⇒ выбор типа и расхода смазочного вещества ⇒ ⇒ выбор параметров шероховатости поверхности инструмента ⇒ задание границ изменения технологических параметров (контактного давления, деформации, скорости деформирования и температуры) ⇒ запуск на расчет.

Стандартная процедура постановки задачи на расчет в программе AutoForm: импорт геометрии детали в формате *.step и получение оболочки ⇒ ориентация заготовки и инструмента относительно направления подачи прессы ⇒ выбор материала заготовки и толщины

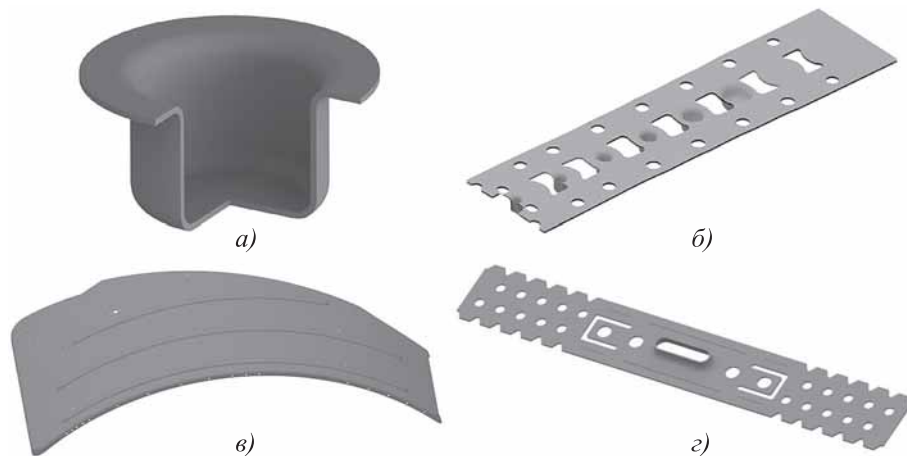


Рис. 3. Машиностроительные 3D-модели деталей, изготавливаемых методами листовой штамповки:

а — стаканчик (I-ОС); б — колпачок (II-ШЛ); в — переднее крыло грузового автомобиля ЗиЛ 157К (III-Ф); г — скоба крепления (IV-СП)

исходного материала ⇒ выбор штамповочных операций и разработка плана проведения процесса ⇒ создание заготовки ⇒ ⇒ задание общих настроек процесса, включая условия трения ⇒ настройка операции процесса: задание геометрии инструмента, параметров операции (перетяжные ребра, ловители, условия трения) ⇒ установка метода расчета и запуск на расчет.

Взаимосвязь результатов расчетов в программе TriboForm с данными препроцессора AutoForm реализуется за счет подготовки с помощью функции экспорта файла из TriboForm (расширение файла *.tfaf). Далее открывается база данных СВ и создается новое СВ, импортируется созданный в TriboForm файл (расширение файла *.tfaf), а также выбирается модель трения TriboForm. После этого открывается база данных деформируемых материалов, выбирается материал и в разделе "Смазка" ("Lubrication") выбирается новое созданное СВ. Материал может быть сохранен в новой базе данных с расширением *.mtb.

Как было указано выше, шероховатость играет значительную роль в операциях листовой штамповки. Поэтому необходимо учитывать морфологию поверхности (топографическая шероховатость Sa) и расход СВ (модель трения по TriboForm). Стандартно топографическую шероховатость (Sa) в отличие от линейной (Ra) представляют в виде реконструированных 3D-областей или в виде их проекций на плоскость (топографическая карта), которые представлены на рис. 4. Для сокращения расчетного времени в TriboForm воспроизводится участок рельефа (репрезентативная область/поверхность) с заданными параметрами (рис. 5) и затем он распространяется на всю геометрию детали в AutoForm.

TriboForm позволяет в динамическом режиме отобразить смятие выступов представительной поверхности и функциональное графическое изменение следующих параметров: деформация неровностей, контактное давление, коэффициент трения (рис. 6), а также площадь контакта и расход СВ.

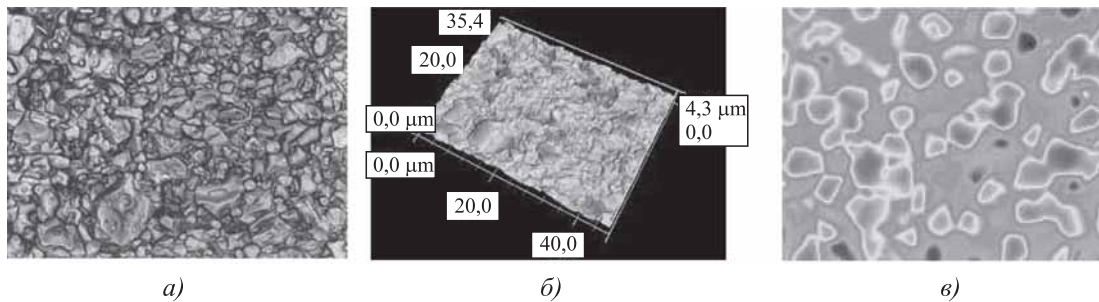


Рис. 4. Топографические характеристики поверхности керамического образца (×6000) [12]:
 а — исходная монохромная фотография поверхности; б — реконструированная 3D-область; в — топографическая карта

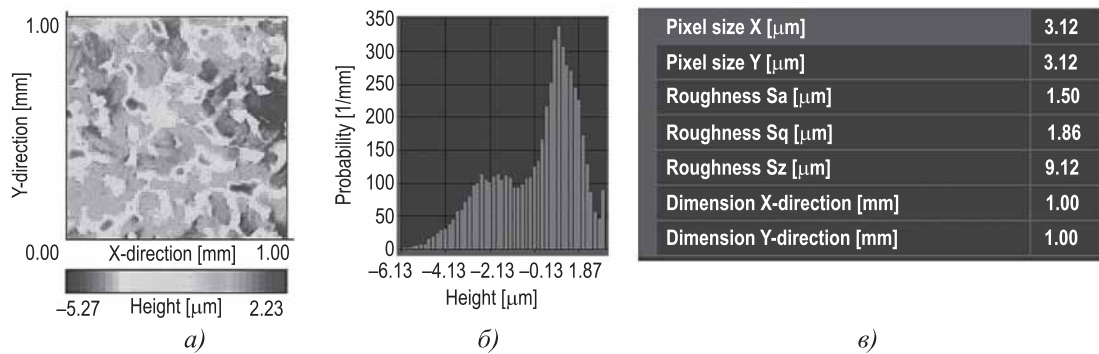


Рис. 5. Характеристика представительного элемента поверхности с заданными параметрами в TriboForm:
 а — топографическая карта; б — вероятность распределения выступов/впадин; в — численные показатели шероховатости поверхности

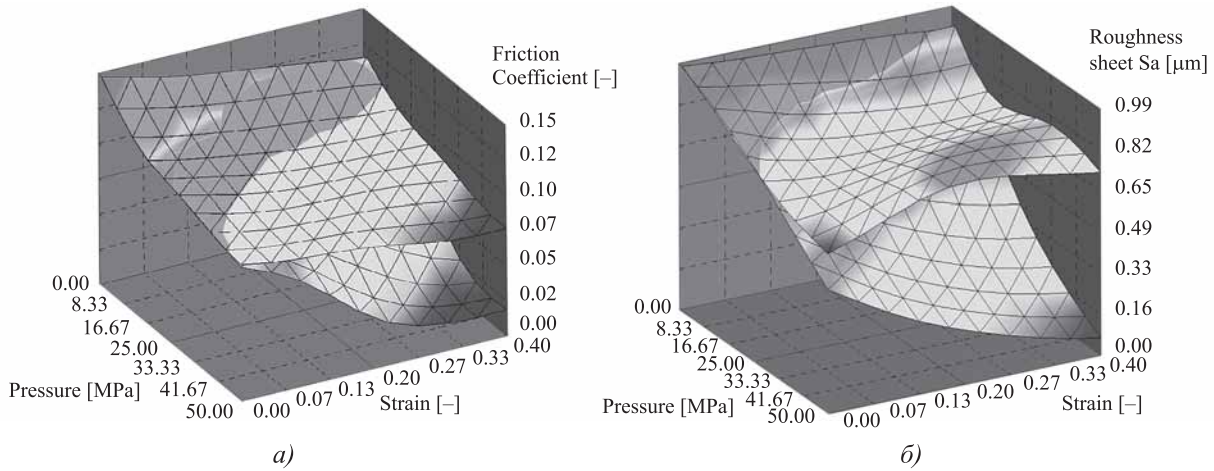


Рис. 6. Функциональное графическое изменение параметров по результатам расчетов в TriboForm:

a — *OZ*: коэффициент трения; *OY*: деформация; *OX*: давление; скорость деформирования 1 мм/с; температуры 20 и 60 °С; *b* — *OZ*: параметр шероховатости; *OY*: деформация; *OX*: давление; скорости деформирования 1 и 200 мм/с; температура 20 °С

В табл. 2 приведены 3D-области представительных поверхностей, полученные в TriboForm для рассматриваемых четырех изделий, с указанием исходных граничных условий по объектам системы заготовка—смазочное вещество—инструмент. Расчет ведется быстро. Решатель TriboForm определяет коэффициент трения на основе второй и третьей моделей (см. рис. 1). Вторую модель применя-

ют для определения общей площади контакта выступов, а третью модель — для определения объема смазочного вещества, который перераспределится в результате перетекания и образования смазочных "карманов".

В третьей модели применены контактные конечные элементы давления. Коэффициент трения μ рассчитывается как отношение суммы сдвигового напряжения деформации вы-

2. Граничные условия и 3D-области представительной поверхности исследуемых деталей

Объект системы	3D-область детали			
	I-OC	II-ШЛ	III-Ф	IV-СП
Заготовка	Низкоуглеродистая сталь с ГП; $Sa = 1,5$ мкм	Низкоуглеродистая сталь с ЭГП; $Sa = 2,0$ мкм	Низкоуглеродистая сталь с ЭГП; $Sa = 1,5$ мкм	Низкоуглеродистая сталь без покрытия; $Sa = 1,5$ мкм
Смазочное вещество	Масло для вытяжки			
	Расход смазочного вещества, г/м ²			
	1,2	2,0	2,0	1,2
Инструмент	Инструментальная сталь			
	$Sa = 0,4$ мкм	$Sa = 0,4$ мкм	$Sa = 0,2$ мкм	$Sa = 0,4$ мкм
Обозначения: ГП — гальваническое покрытие; ЭГП — электрогальваническое покрытие.				

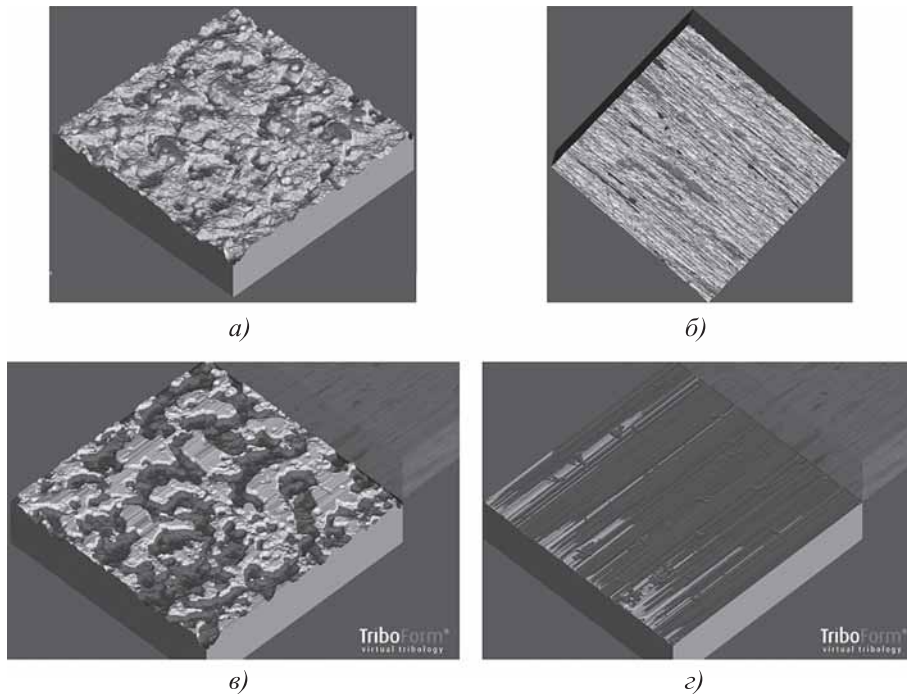


Рис. 7. Динамический режим визуализации смятия выступов/впадин в TriboForm:
a — исходная геометрия шероховатости на заготовке с расходом СВ 1,2 г/м²; *б* — исходная геометрия шероховатости на инструменте; *в* — степень деформации 0,2; *г* — степень деформации 0,4

ступов/впадин и сдвигового напряжения деформации в пограничном слое (смазочное вещество — твердое тело) к нормальному давлению к поверхности заготовки [13, 14]. По результатам расчетов получены следующие значения коэффициента трения μ : для детали I-OC — 0,081; для II-ШЛ — 0,113; для III-Ф — 0,096; для IV-СП — 0,077.

Влияние степени деформации на изменение топографии поверхности материала наглядно продемонстрировано на рис. 7, где инструмент с параметром шероховатости $Sa = 0,6$ мкм контактирует с поверхностью заготовки ($Sa = 1,0$ мкм) сначала в направлении нормали к поверхности (деформация сжатия), а затем перпендикулярно ей (сдвиговая деформация).

По результатам расчетов в AutoForm по модели трения TriboForm возможна визуализация полей изменения шероховатости поверхности поковки и расхода СВ, а также потери устойчивости в ходе процесса штамповки. Для каждой детали было проведено моделирование и назначены операции при разработке пооперационного плана штамповки.

Для исследуемых деталей были применены следующие операции:

для I-OC: вытяжка (*D*-20), обрезка (*T*-30) и контроль пружинения (*M*-40);

для II-ШЛ: вырубка карточки из ленты (*B*-10), пробивка отверстий под ловителя инструмента (*F*-20), вытяжка (*D*-30, *D*-40, *D*-50, *D*-60, *D*-70, *D*-80) и обрезка (*T*-90);

для III-Ф: вытяжка (*D*-20), обрезка (*T*-30) и пробивка отверстий (*T*-40, *T*-50);

для IV-СП: обрезка по контуру (*T*-10), пробивка отверстий (*T*-20, *T*-30), отбортовка (*D*-40) и контроль пружинения (*M*-50).

Начальные условия трения: по модели AutoForm — $\mu = 0,15$ или TriboForm — $\mu = \text{var}$.

Обсуждение результатов моделирования.

Результаты моделирования для четырех деталей показаны на рис. 8—11. Области, в которых наблюдаются различия по двум моделям трения, обведены замкнутой

штриховой линией. Моделирование штамповки детали I-OC не показало разрывов ни по одной из двух моделей трения (см. рис. 8). Имеются небольшие различия в безопасных областях растяжения—сжатия на диаграмме предельного формоизменения, представленной для составной заготовки. Для участка, выполненного из стали DC03, увеличивается область безопасного формования в области вертикальной стенки для модели трения TriboForm. При использовании модели трения AutoForm на материале DC03 появляется небольшая область (см. рис. 8, б, слева), свидетельствующая о высокой вероятности разрыва материала.

На шкале штампуемости показаны места утолщения (thickening), сжатия (compress), незначительного растяжения (insufficient stretch), безопасного деформирования (safe), вероятного образования разрывов и разрушений (risk of splits), повышенного утонения (excess thinning), а также места разрывов и разрушений (splits). По полям утонений различий почти нет. Более интенсивное пружинение наблюдается по модели трения AutoForm в области фланца. Моделирование штамповки детали II-ШЛ показало (см. рис. 9), что вероятность разрушения детали выше на последних двух

вытяжных переходах при применении модели трения TriboForm (более обширная область на ДПФ и интенсивное утонение). Штампуемость материала немного отличается во фланцевой области (в области прижима). Разница значений утонений в исследованных точках не превышает 0,03 мм (см. рис. 9, в).

Моделирование детали III-Ф показало (см. рис. 10) более плотную область безопасного формообразования поковки. Присутствуют небольшие различия в площади областей безопасной вытяжки. Отсутствуют утонения, которые могут приводить к появлению разрывов. Разница значений утонений в иссле-

дованных точках не превышает 0,02 мм (см. рис. 10, в).

Моделирование детали IV-СП показало (см. рис. 11) сильную зависимость формообразования закругленных областей детали центрального выреза при операции отбортовка от коэффициента трения, с образованием локальных разрушений. Имеется область плавного перехода от разрушения к безопасной области на вертикальной стенке при использовании модели трения TriboForm. Минимальные и максимальные значения пружинения составили (AutoForm/TriboForm): -0,37 мм/-0,72 мм и 0,28 мм/0,5 мм. Поля пружинения по двум

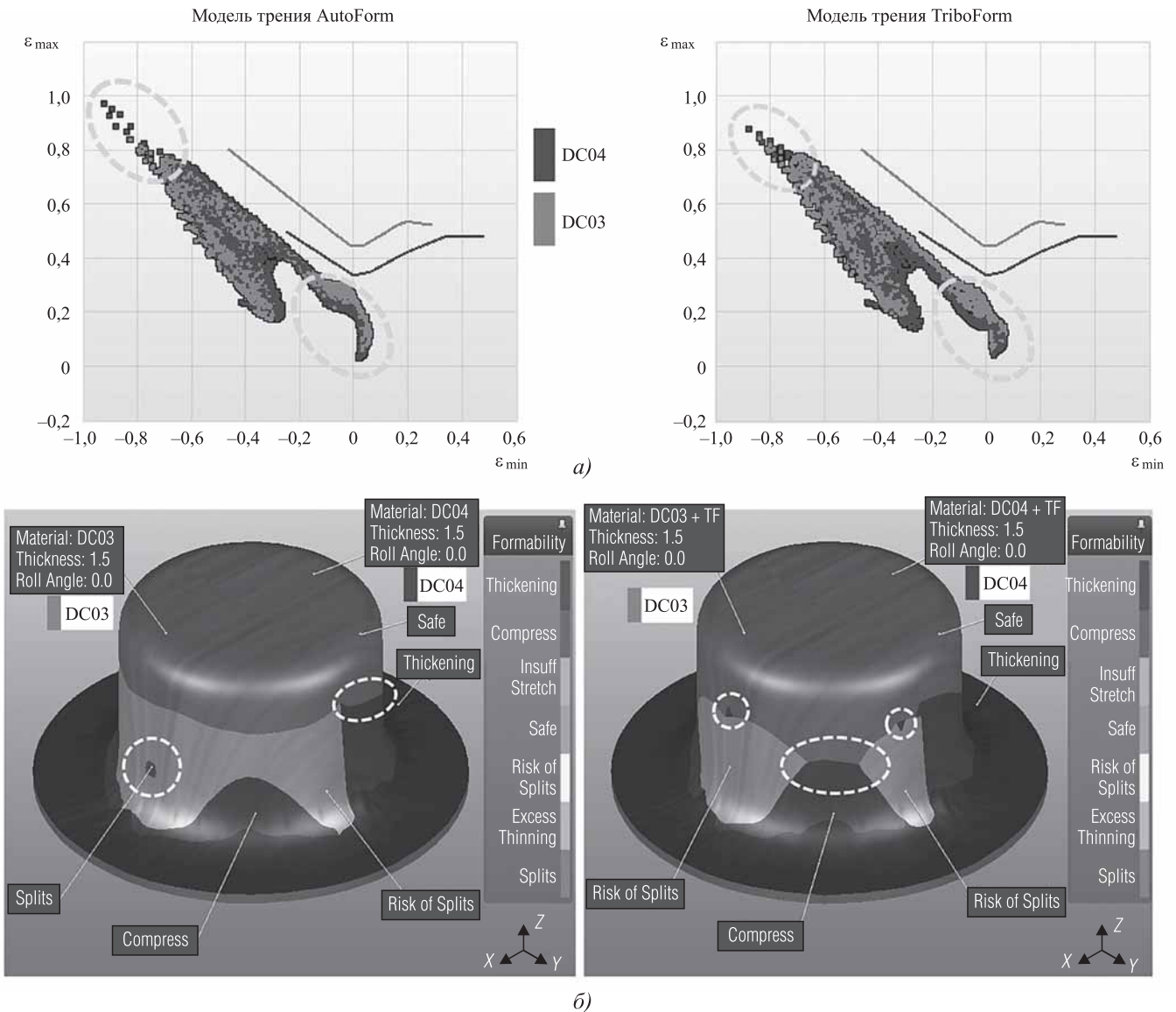


Рис. 8 (Начало). Поля с результатами расчетов для детали I-ОС:
 а — ДПФ (FLD); б — штампуемость (formability)

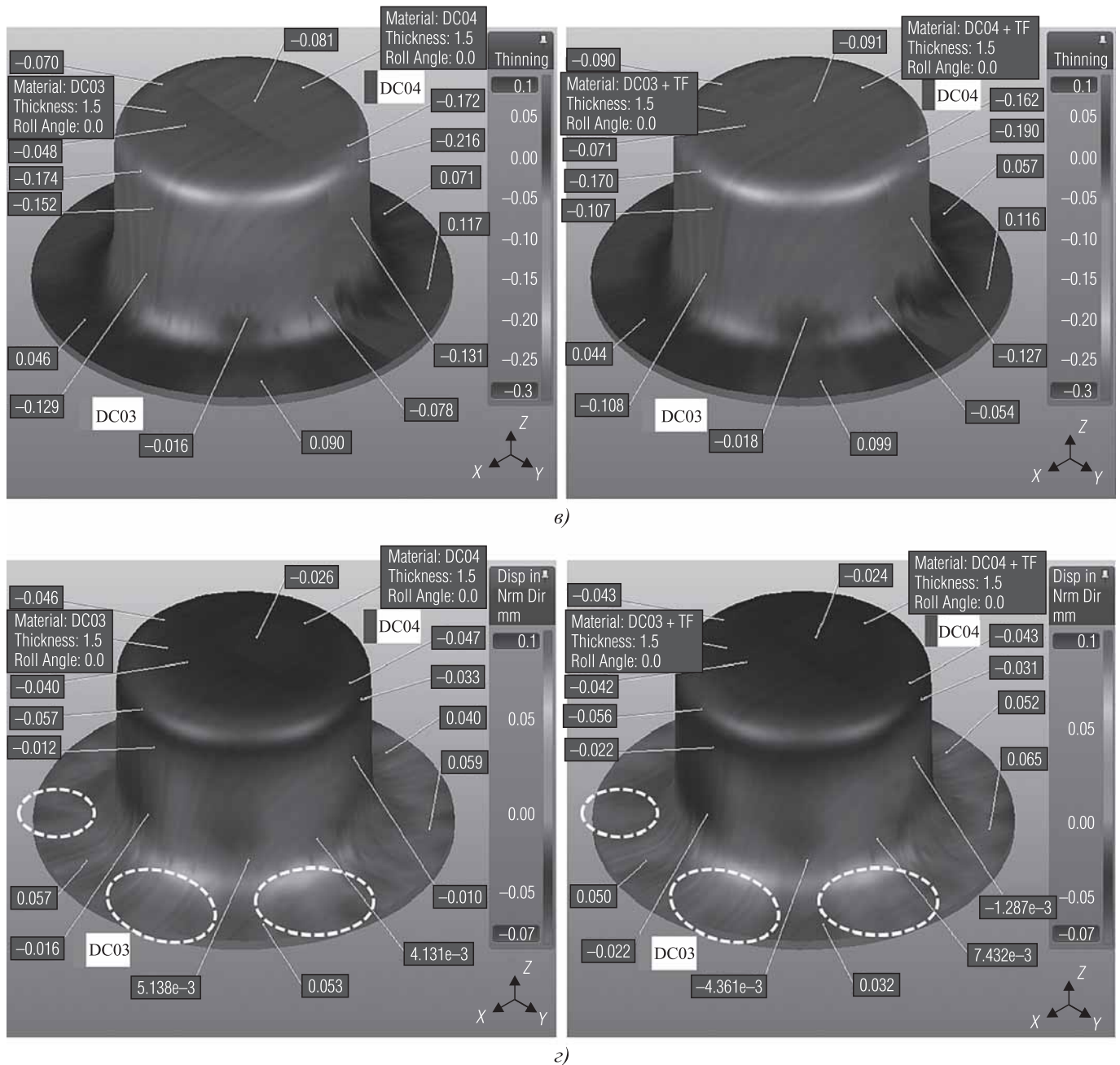


Рис. 8 (Продолжение). Поля с результатами расчетов для детали I-OC:

ϵ — утонение (thinning); ε — пружинение (springback)

моделям были равны (AutoForm/TriboForm): 0,65 мм/1,22 мм.

На рис. 12 (см. обложку) показаны поля изменения шероховатостей на последней операции в операционном плане моделируемого процесса. Наиболее сильное "выглаживание" шероховатости произошло на материале DC04 составной заготовки (уменьшение до 0,4 мкм). Выполненная из материала DC03 другая часть заготовки имеет градиентное изменение шероховатости, причем наибольшее

изменение приходится на фланцевую часть и область перехода от фланца к матрице, а наименьшее — на донную часть, т.е. там, где наблюдалось максимальное утолщение. На второй детали (см. рис. 12, б) наибольшее уменьшение шероховатости происходит на фланцевой части и на вертикальной стенке начиная с третьего вытяжного перехода, а наименьшее — в области радиуса.

Такая тенденция сохраняется на протяжении двух вытяжных переходов и изменяется

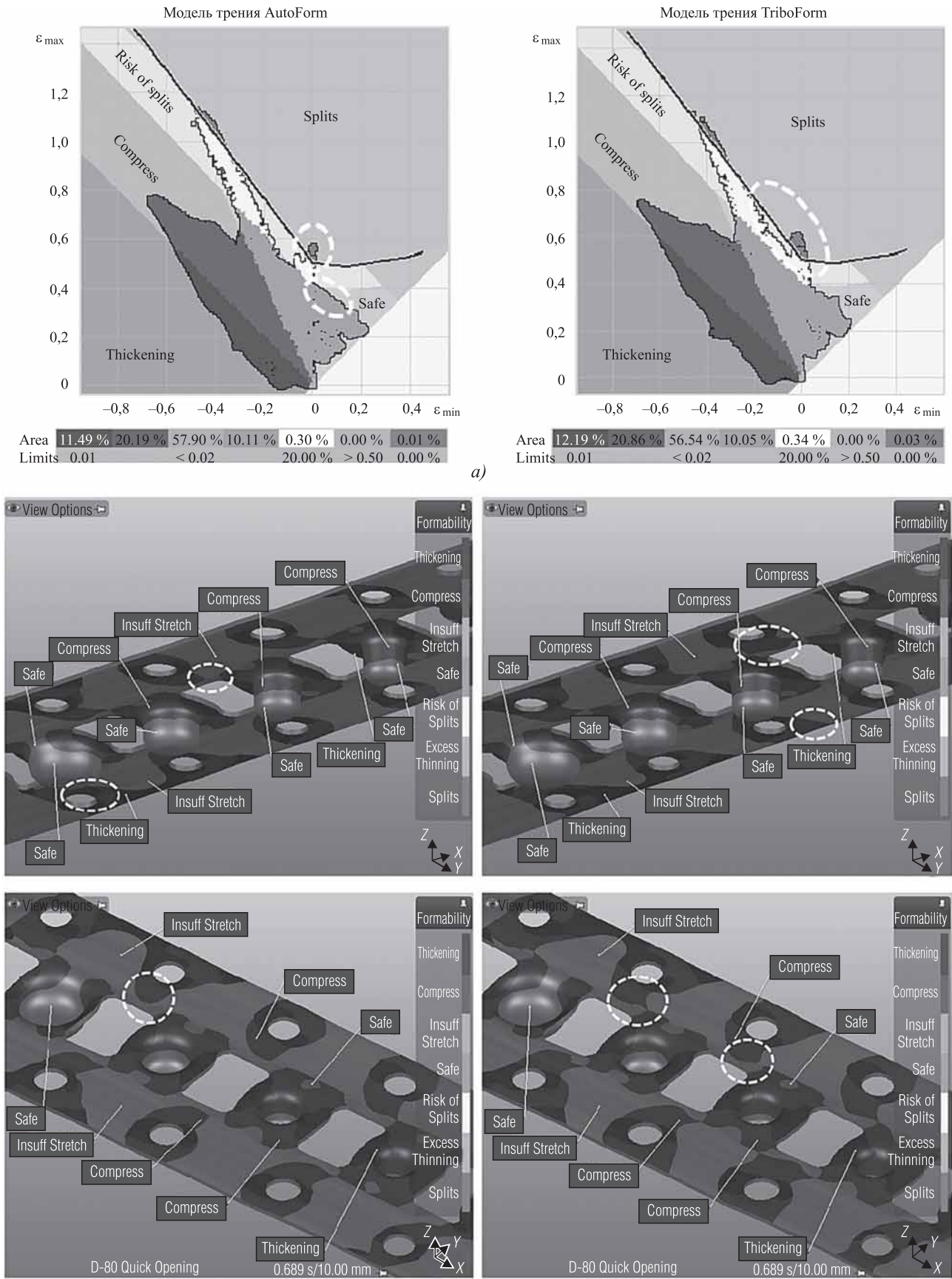
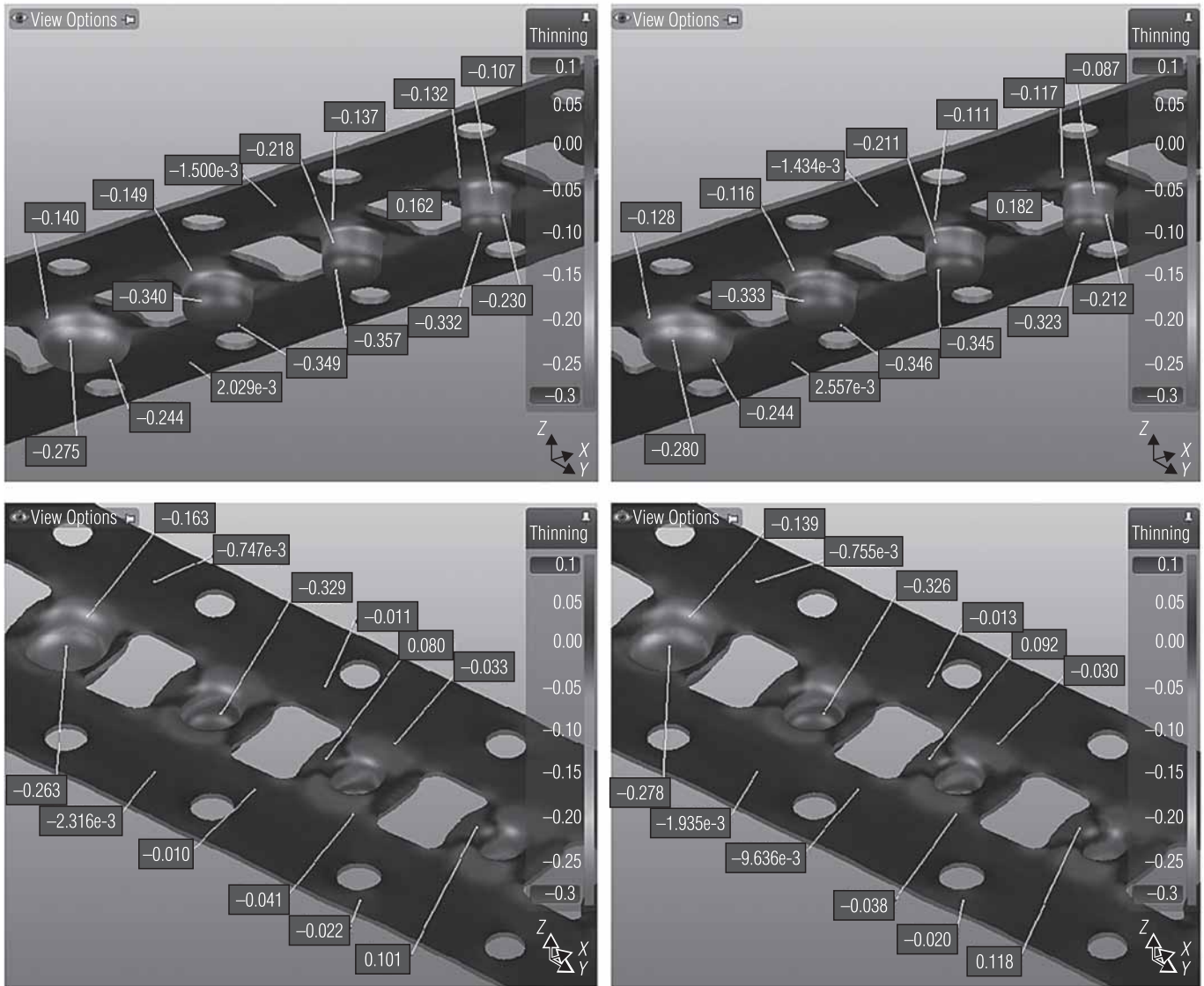


Рис. 9 (Начало). Поля с результатами расчетов для детали II-III:

а – ДПФ (FLD); б – штампуемость (formability)



в)

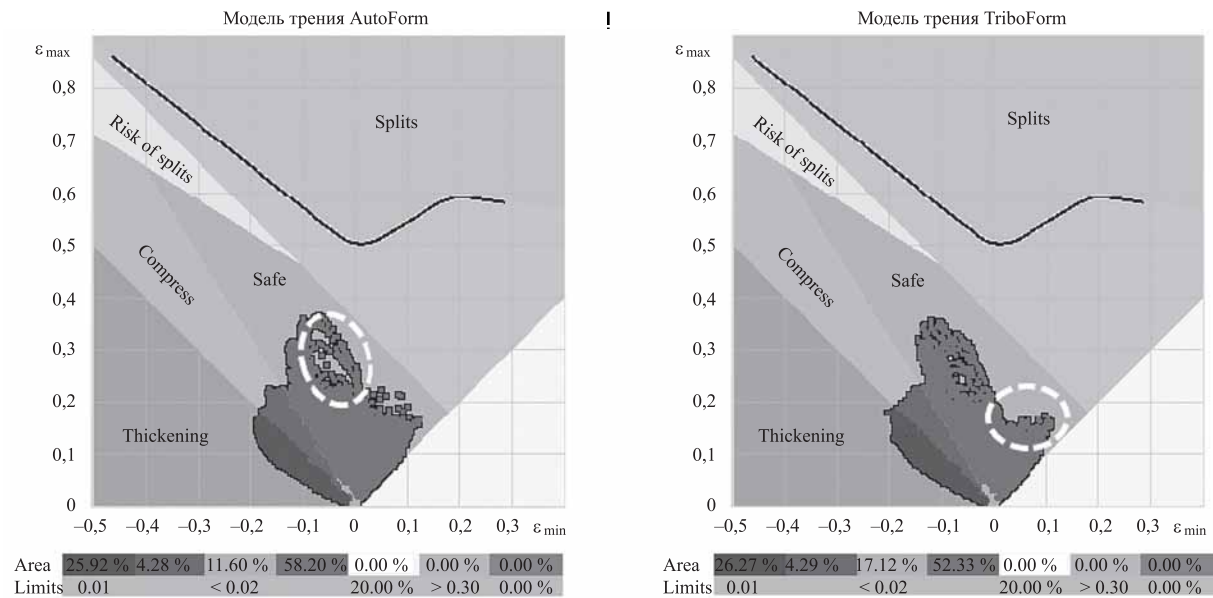
Рис. 9 (Продолжение). Поля с результатами расчетов для детали II-ШЛ:

в — утонение (thinning)

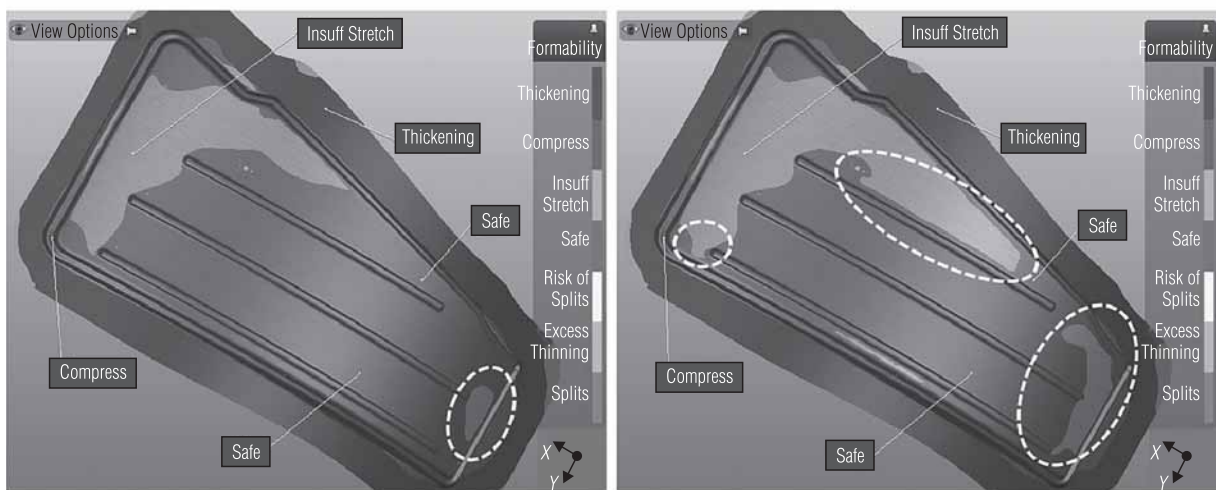
в сторону увеличения шероховатости в области фланца после них. У третьей детали наибольшее изменение шероховатости наблюдается на продольных ребрах и на стенках детали. Значения изменяются в интервале от 1,2 до 0,5 мкм. У четвертой детали шероховатость практически остается неизменной по всей поверхности. Только в областях четырех параллельных симметричных выштамповок наблюдается снижение параметра шероховатости до 1,2...1,0 мкм. Таким образом, наиболее интенсивная деформация по контактной поверхности системы заготовка—инструмент

проходит для деталей I-ОС и II-ШЛ, так как исходное значение топографической шероховатости заготовки заменяется на исходное значение топографической шероховатости инструмента.

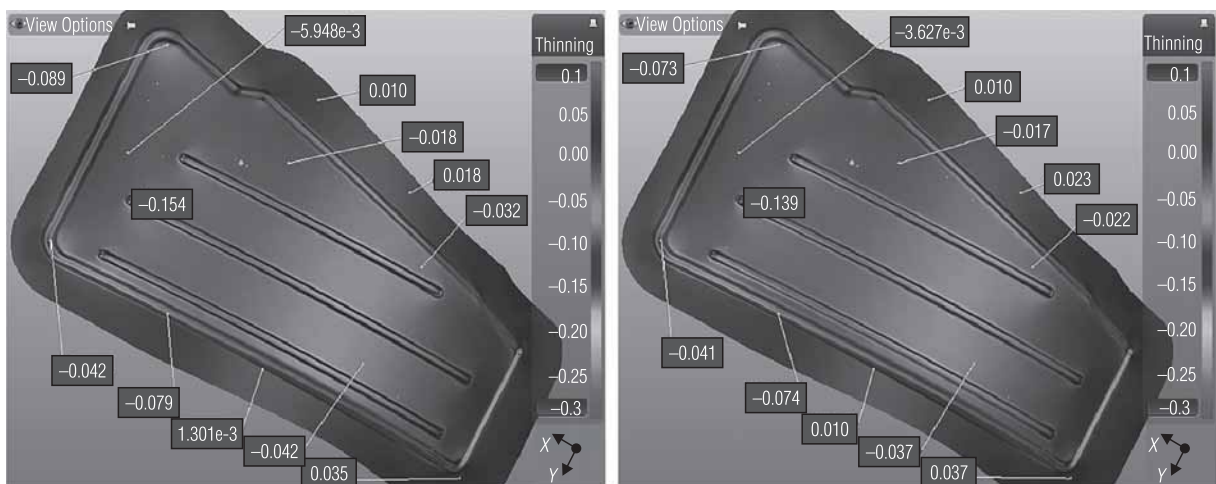
По результатам расчетов составлена табл. 3, в которой показано изменение коэффициентов трения в зависимости от выбранных моделей, причем максимальное значение было получено на модели трения Кулона (AutoForm), а также разница Δ и относительная разница ε_{Δ} между значениями полученных коэффициентов. Установлено, что при разнице коэф-



a)



b)

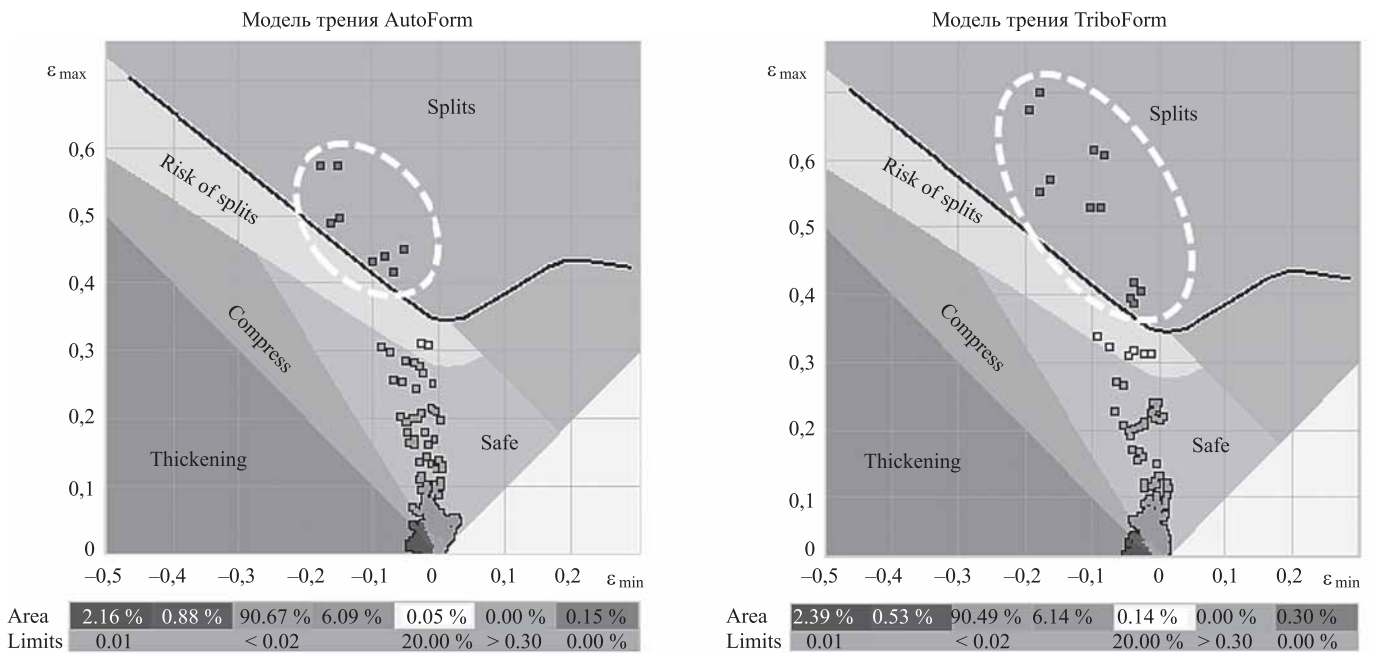


в)

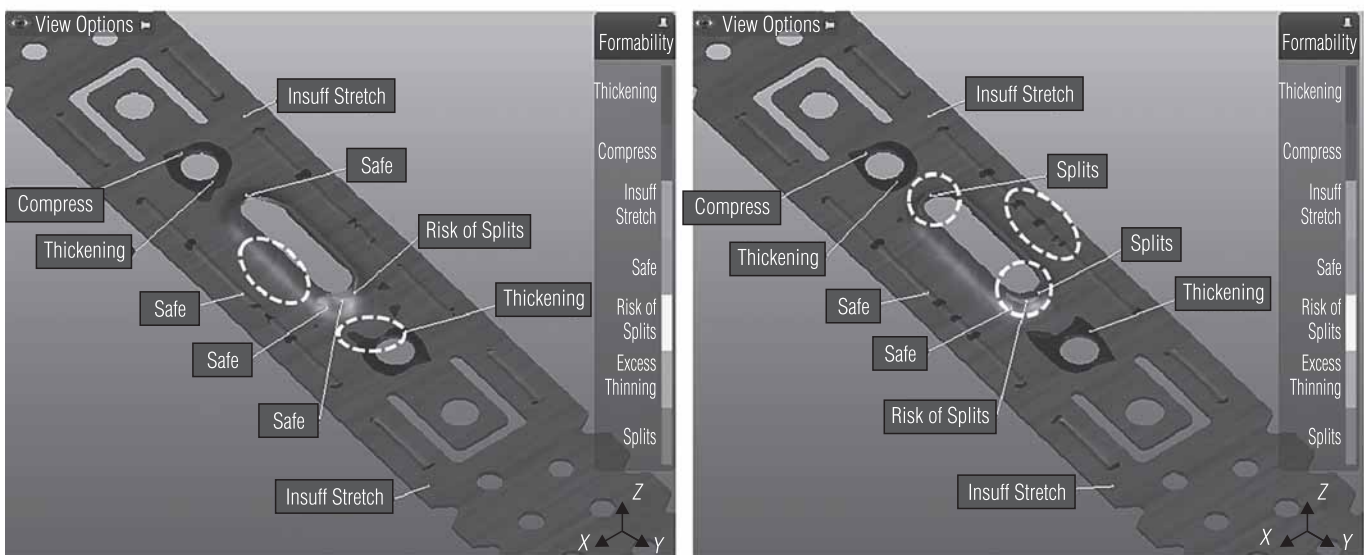
Рис. 10. Поля с результатами расчетов для детали Ш-Ф:
 а — ДПФ (FLD); б — штампуемость (formability); в — утонение (thinning)

3. Изменение значений коэффициента трения μ

Кодировка детали	Коэффициент трения μ		Δ	$\epsilon_{\Delta}, \%$	Изменение параметров на операциях штамповки
	AutoForm	TriboForm			
I-OC	0,15	0,081	0,069	46	> 40 % (вытяжка)
II-ШЛ		0,113	0,037	25	< 40 %
III-Ф		0,096	0,054	36	< 40 % (вытяжка)
IV-СП		0,077	0,073	49	> 40 % (отбортовка)



a)



b)

Рис. 11 (Начало). Поля с результатами расчетов для детали IV-СП:
 а — ДПФ (FLD); б — штампуемость (formability)

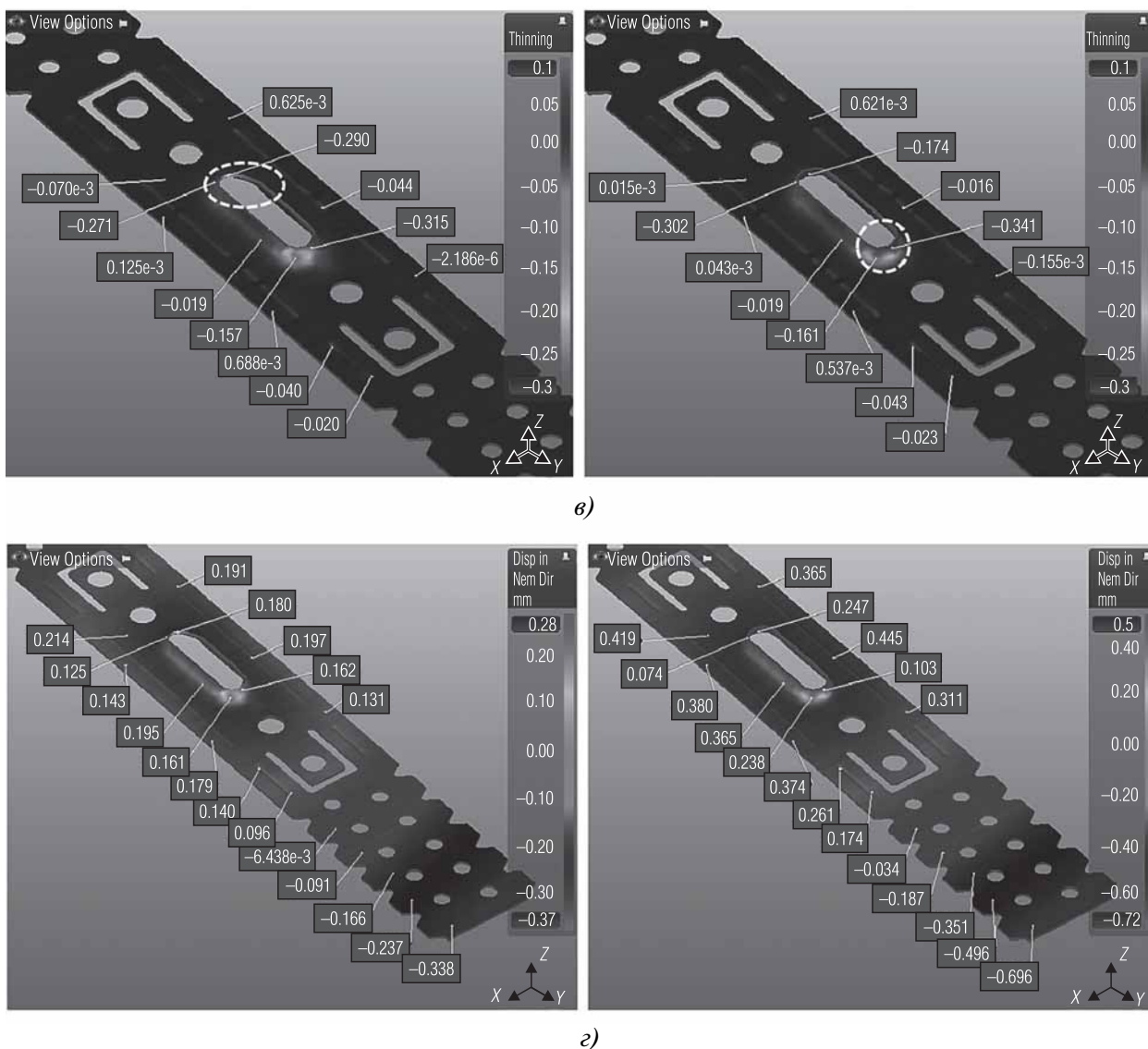


Рис. 11 (Продолжение). Поля с результатами расчетов для детали IV-СП:

а — утонение (thinning); б — пружинение (springback)

коэффициентов трения по двум моделям трения до 36 % разница в видимых изменениях полей значений почти отсутствует. При разнице более 40 % поля изменяются более интенсивно. Это наблюдение может являться как закономерным, так и случайным. Поэтому для дальнейшего уточнения необходимо проводить моделирование по модели TriboForm для одной детали на разных трибологических системах.

Процедуру выявления влияния коэффициента трения по модели TriboForm можно валидировать двухшаговым методом:

1) сведение в таблицу результатов расчетов по двум моделям трения (см. табл. 3);

2) выбор интересующего случая и анализ влияния шероховатости поверхностей инструмента и заготовки, а также расхода смазочного вещества.

Заключение. Изучены четыре случая штамповки различных деталей, получаемых разными операциями листовой штамповки (осесимметричная вытяжка, штамповка в ленте, вытяжка кузовной детали, штамповка строительной детали), с применением моделей трения Кулона (модель трения AutoForm) и шероховатости поверхности (модель трения TriboForm).

Установлено, что модель трения TriboForm, основанная на статистическом распределении

репрезентативного объема с топологической (плоскостной) шероховатостью и расходом наносимого смазочного вещества, влияет на результат моделирования в программе AutoForm.

В изученных четырех случаях степень этого влияния была незначительной, т.е. выбранные параметры в модели TriboForm почти соответствовали трению, равному трению, вычисленному по модели Кулона, без учета локальных изменений, больше связанных с напряженно-деформированным состоянием материала. В более жестких условиях вытяжки и при более сложной геометрии изделия эффект влияния шероховатости и расхода смазочного вещества возрастет, так как увеличатся уровень контактного давления и коэффициент трения в результате неравномерного перераспределения смазочного вещества по контактными поверхностям, образования большего числа смазочных "карманов" и повышения касательного напряжения на контактных поверхностях инструмент—смазка и смазка—заготовка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Петров А.Н., Логинов Б.А., Петров М.А.** Исследование шероховатости и толщины теплозащитных покрытий для заготовок из никелевых сплавов // Заготовительные производства в машиностроении. 2016. № 4. С. 42—46.
2. **Грудев А.П., Зильберг Ю.М., Тилик В.Т.** Трение и смазки при обработке материалов давлением. М.: Металлургия, 1982. 312 с.
3. **Jorgensen J.F., Carneiro K., Madsen L.L.** The scanning tunneling microscope and surface characterization // Nanotechnology. 1993. Vol. 4 (3). P. 152—158.
4. **Roughness** parameters of surfaces by atomic force microscopy / K. Carneiro, C.P. Jensen, J.F. Jorgensen, J. Garoes // CIRP ANNALS. 1995. Vol. 44 (1). P. 517—522.
5. **Арутюнов П.А., Толстихина А.Л., Демидов В.Н.** Система параметров для анализа шероховатости и микрорельефа поверхности материалов в сканирующей зондовой микроскопии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1999. № 9. Т. 65. С. 27—37.
6. **Petrov M.A., Petrov A.N., Petrov P.A.** Numerical Investigation of the Material Behaviour during Compression Tests for Samples with Rough Surfaces Represented in Different Geometry Scale Factors // Key Engineering Materials. 2016. Vol. 716. P. 736—752.
7. **ГОСТ 25142—82.** Шероховатость поверхности. Термины и определения.
8. **ISO 4287:1997.** Geometrical Product Specifications (GPS). Surface texture: Profile method Terms, definitions and surface texture parameters.
9. **ISO 25178.** Geometrical product specification (GPS). Surface texture: Areal.
10. **ISO 13565.** Geometrical Product Specifications (GPS). Surface texture: Profile method; Surfaces having stratified functional properties.
11. **Hol J., Wiebenga J.H., Stock J. et al.** Improving stamping simulation accuracy by accounting for realistic friction and lubrication conditions: Application to the door-outer of the Mercedes-Benz C-class Coupé // Journal of Physics: Conference Series. Режим доступа: <https://www.iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/734/3/032091/pdf>.
12. **Keyence** Instruction to surface roughness measurement. Режим доступа: <https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/lp/download.jsp> (дата обращения: 05.09.2019).
13. **Multi-scale** friction modeling for sheet metal forming: The boundary lubrication regime / J. Hol, V.T. Meinders, M.B. de Rooij, A.H. van den Boogaard // Tribology International. 2015. Vol. 81. P. 112—128.
14. **Sigvant M., Pilthammar J., Hol J. et al.** Friction and lubrication modeling in sheet metal forming simulations of a Volvo XC90 inner door // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 159. 012021. <https://www.iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/159/1/012021/pdf>.

*Михаил Александрович Петров, канд. техн. наук,
m.a.petrov@mospolytech.ru*



УДК 621.771.63

DOI: 10.36652/1684-1107-2020-18-8-373-376

С.В. Поворов¹, Д.В. Егоров², Д.С. Волгин¹

¹Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
²ООО "Мобипроф", г. Москва)

Определение силы резания гнутого профиля проката в гильотине с фасонными матрицами и ножом

Исследовано изменение силы резания в процессе резки гнутого профиля проката в гильотине с фасонными матрицами и ножом. Установлено, что для расчета силы резания в фасонной гильотине можно использовать формулы для определения силы резания листовой заготовки на гильотине с обычными прямыми ножами.

Ключевые слова: гнутые профили проката; профилегибка; фасонная гильотина.

The change in cutting force in the cutting process of roll-formed section in shaped dies-knife guillotine is studied. It is established that to calculate the cutting force in shaped guillotine, one can use formulas to determine the cutting force of sheet blank on conventional straight knives guillotine.

Keyword: roll-formed section; roll forming; shaped guillotine.

Определение силы резания проводили на примере профиля СП-255×15×10-75×45.07. Этот профиль относится к классу С-образных профилей и имеет центральный трапециевидный продольный рифт, придающий профилю жесткость. Размеры профиля на всех стадиях формообразования определяли в соответствии с методикой, изложенной в работе [1]. Профиль изготавливали на профилегибочном стане из листовой заготовки из стали 08пс толщиной 0,7 мм. Чертеж профиля показан на рис. 1. Данный профиль применяют в сельском хозяйстве для возведения высоких грядок.

Для отрезки данного профиля использовали гильотину с гидравлическим приводом, трехмерная цифровая модель которой изображена на рис. 2. Гильотина с помощью опор установлена непосредственно на раму профилегибочного стана, что делает линию компактной и облегчает процесс производства профиля. В данной конструкции две матрицы закреплены на нижней плите гильотины и неподвижны. Вертикальное перемещение ножа обеспечивается рабочим ходом штока гидроцилиндра, установленного на верхней плите гильотины.

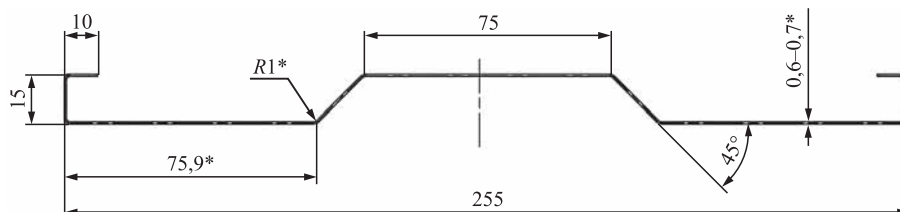


Рис. 1. Чертеж профиля СП-255×15×10-75×45.07:

* — неконтролируемый размер; штрипс ≈312,5 мм

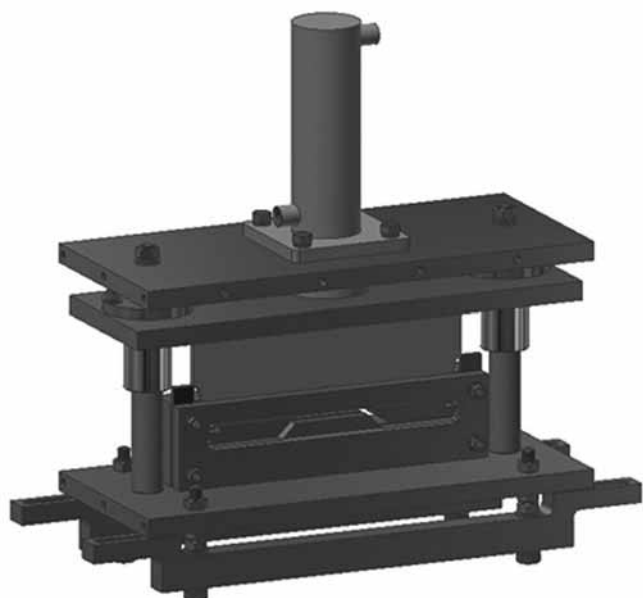


Рис. 2. Конструкция гильотины

В процессе резания матрица (рис. 3) остается неподвижной, обеспечивая при этом сохранение геометрической формы отрезаемого профиля. Матрица изготовлена из термообработанной легированной стали ХВГ и имеет высокую твердость и износостойкость. Отличием входной матрицы от выходной является наличие заходной фаски, позволяющей переднему концу профиля зайти в гильотину. К форме матрицы предъявляются следующие требования:

- форма прорези в матрице должна обеспечивать беспрепятственное прохождение профиля для того, чтобы поверхность профиля не имела дефектов;
- расположение режущих кромок должно максимально соответствовать геометрии профиля для предотвращения смятия профиля в процессе резания и образования заусенцев.

Режущий нож гильотины — подвижный и обеспечивает относительное перемещение режущих кромок. Как и матрица, нож изготовлен из термообработанной легированной стали ХВГ.



Рис. 3. Матрица



Рис. 4. Профиль режущего ножа

Профиль ножа, предназначенного для порезки рассматриваемого профиля, приведен на рис. 4. Форма ножа в совокупности с формой профиля определяет силу резания и должна обеспечивать:

- непрерывность процесса резания для предотвращения образования заусенцев на концах профиля;
- отход стружки в нужном направлении для предотвращения застревания обреза между деталями гильотины, которое приводит к повышенному трению и износу;
- устойчивость к сколам режущих кромок в процессе работы для увеличения срока службы ножа;
- минимальное значение силы резания.

Нож находится между входной и выходной матрицами, что напоминает вырубку в штампе. Такую схему используют при резании закрытых профилей. Так как режущие кромки находятся на обеих матрицах, то сила резания удваивается. Также недостатком данной схемы является наличие обреза, ширина которой равна ширине ножа. Но значительное преимущество данной схемы заключается в ограничении перемещения профиля в процессе резания контурами обеих матриц, что помогает предотвратить смятие профиля в месте резания.

Силу резания определяют по выражению [2]:

$$P = k_1 k_2 k_3 \frac{2 - \varepsilon_h}{2 \operatorname{tg} \alpha} h^2 \sigma_{\text{в}}, \quad (1)$$

где k_1 — коэффициент материала (0,6 для мягких материалов; 0,7 — для твердых);

k_2 — коэффициент, учитывающий затупление режущих кромок (1,15...1,25 — при холодном резании);

k_3 — коэффициент, учитывающий увеличение боковых зазоров (1,2...1,3);

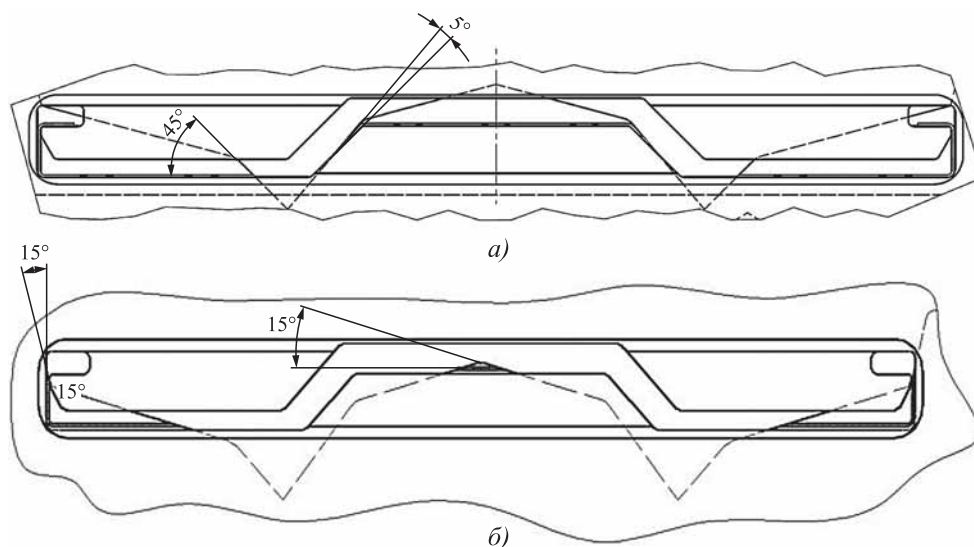


Рис. 5. Первый (а) и второй (б) этапы резания

ε_h — коэффициент надреза, для стали 08пс $\varepsilon_h = 0,5$;

α — угол наклона ножа, °;

h — толщина профиля, мм;

σ_B — предел прочности материала профиля, МПа.

Это выражение изначально предназначено для определения силы резания листового металла на обычной гильотине с одним ножом, но поскольку процесс резания в рассматриваемом устройстве с фасонной матрицей и ножом идентичен, то это выражение применимо для определения силы резания с учетом геометрических особенностей разрезаемого металлического профиля и инструмента.

Для определения максимальной силы резания были рассмотрены два этапа этого процесса (рис. 5). Из рис. 5, а (первый этап) видно, что резание происходит под углами 5 и 45°. В этом случае формула (1) примет вид:

$$P_1 = \left(0,6 \cdot 1,15 \cdot 1,2 \left(\frac{2-0,5}{2 \operatorname{tg} 5^\circ} + \frac{2-0,5}{2 \operatorname{tg} 45^\circ} \right) \times \right. \\ \left. \times 0,7^2 \cdot 400 \right) 2 \cdot 2 = 6051 \text{ Н.}$$

Умножение два раза на "2" показывает, что резание происходит также по другую сторону от плоскости симметрии профиля и на двух матрицах (входной и выходной).

Второй этап процесса резания показан на рис. 5, б. Аналогично первому случаю, выражение (1) примет вид:

$$P_2 = \left(0,6 \cdot 1,15 \cdot 1,2 \left(\frac{2-0,5}{2 \operatorname{tg} 15^\circ} + \frac{2-0,5}{2 \operatorname{tg} 15^\circ} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{2-0,5}{2 \operatorname{tg} 15^\circ} \right) 0,7^2 \cdot 400 \right) 2 \cdot 2 = 5451 \text{ Н.}$$

Как видно из результатов расчета, максимальное расчетное значение силы резания действует на первом этапе.

В процессе проведения эксперимента измеряли давление масла в гидроцилиндре гильотины с помощью манометра (рис. 6). В процессе резания максимальное зафиксированное пока-

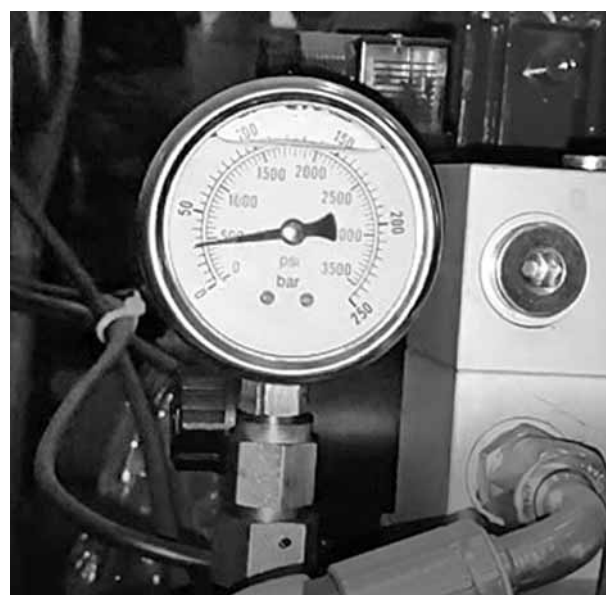


Рис. 6. Показания манометра в процессе резки

зание манометра составило 28 бар = 2,8 МПа. Силу определяли как произведение давления на площадь поршня диаметром 50 мм, в результате получили значение силы 5497 Н. Таким образом, отклонение максимального значения силы, определенного по выражению (1), от значения силы, определенного экспериментально, составляет 10 %, что является приемлемым для практического применения.

Выводы

1. Выражение (1), полученное для определения силы резания листового металла в обычной гильотине, можно использовать и в случае резания гнутого профиля проката в гильотине с фасонными матрицами и ножами.

2. Отклонение значения силы резания, определенного теоретическим способом (по выражению (1)) от значения, измеренного в процессе эксперимента, не превышает 10 %,

что применимо для практических расчетов и выражение (1) можно рекомендовать для определения силы резания гнутых профилей проката в фасонных гильотинах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Поворов С.В.** Расчет размеров профиля листовой заготовки в промежуточных переходах при формовке в роликах по заданным режимам // Заготовительные производства в машиностроении. 2016. № 12. С. 27–32.

2. **Целиков А.И., Полухин П.И., Гребеник В.М. и др.** Машины и агрегаты металлургических заводов. Т. 3. М.: Металлургия, 1988. 680 с.

*Сергей Владимирович Поворов, канд. техн. наук,
povorovs@bmstu.ru;
Дмитрий Васильевич Егоров;
Дмитрий Сергеевич Волгин*



Технофорум–2020

Международная специализированная выставка
«Оборудование и технологии обработки конструкционных материалов»

ОРГАНИЗАТОР: АО «ЭКСПОЦЕНТР»

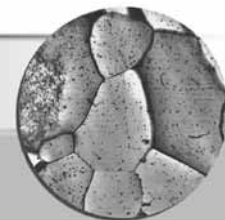
19–22 октября 2020 г., Москва

Место проведения: Центральный выставочный комплекс «Экспоцентр»

Тематика мероприятия

- Комплексные системы наукоемкого высокопроизводительного технологического оборудования для технического перевооружения производственных предприятий основных отраслей промышленности
- Станочные системы и формообразующее оборудование для обработки металлов, камня, дерева, композиционных, полимерных и других материалов
- Аддитивные технологии
- Робототехника и автоматизация производства
- Сварочное оборудование
- Ретрофитинг — технология восстановления потребительских свойств оборудования
- Профильное образование, информационные материалы и научно-техническая литература
- Оборудование и технологии для производства и монтажа металлоконструкций
- Металлоконструкции, листообработка, лист с покрытиями
- Термическая обработка
- Экология в промышленности
- Инструмент для промышленного оборудования
- Композитные материалы, технологии и оборудование

По данным www.technoforum-expo.ru



УДК 669.715

DOI: 10.36652/1684-1107-2020-18-8-377-384

О.Е. Грушко¹, Б.В. Овсянников², В.В. Овчинников¹
(¹Московский политехнический университет,
²АО "Каменск-Уральский металлургический завод")

Влияние микролегирования кальцием на технологические свойства листов сплава В-1341

Рассмотрено влияние микролегирования кальцием на текстуру алюминиевого сплава системы Al—Mg—Si—Cu. Приведены механические свойства при статических и динамических нагрузках, усталостные характеристики, трещиностойкость и жаропрочность листов сплава В-1341 с регламентированной рекристаллизованной структурой в состоянии T1, определена способность к выдавке при холодной штамповке. Приведены результаты эксплуатационных и коррозионных испытаний листов.

Ключевые слова: алюминиевый сплав системы Al—Mg—Si—Cu; микролегирование; кальций; эксплуатационные свойства; коррозионные свойства.

The effect of calcium microalloying on the texture of aluminium Al—Mg—Si—Cu alloy is considered. The mechanical properties of static and dynamic loads, fatigue characteristics, crack resistance and heat resistance of V-1341 alloy sheets with regulated recrystallized structure in the T1 state are presented. The results of service and corrosion testing of sheets are presented.

Keywords: aluminium Al—Mg—Si—Cu alloy; microalloying; calcium; service properties; corrosive properties.

Алюминиевые сплавы широко применяют в различных областях экономики — строительстве, самолетостроении, судостроении, железнодорожном транспорте. Особый интерес представляет возможность использования алюминиевых деформированных сплавов для корпусных деталей автомобилей. Но это осложняется двумя обстоятельствами: более высокой стоимостью по сравнению со сталью и технологическими трудностями холодного формообразования в условиях массового производства.

В настоящее время зарубежные фирмы для корпусных деталей автомобилей применяют листы сплавов серии бxxx системы Al—Mg—Si. Однако эти сплавы склонны к возникновению кристаллизационных трещин при литье и сварке плавлением, а также разнородности листов с выраженной текстурой рекристаллизации, что не позволяет получать детали с качественной поверхностью.

Микролегирование — введение в металл или в сплав небольшого количества легиру-

ющих добавок, общая масса которых не должна превышать 0,1 % массы исходного металла или сплава. Кальций в качестве микролегирующей добавки в алюминиевые деформируемые сплавы не использовали.

Роль малых добавок при микролегировании в алюминиевых сплавах проявляется в преимущественном воздействии добавок на сплав в твердом состоянии (образование твердого раствора внедрения или замещения; изменение размера вторичных зерен, дисперсности, формы и распределения неметаллических включений, строения границ зерен и тонкой структуры зерен; снижение вредного влияния некоторых примесей).

Впервые фазы, содержащие кальций, были обнаружены в слитках сплавов 1230 (Al—Cu—Li) и 1420 (Al—Mg—Li) микрорентгеноспектральным анализом [1], в которых кальций присутствует как неизбежная примесь.

При исследовании сплава 1420 было установлено, что при содержании 0,005...0,05 %

кальций улучшает технологичность при литье слитков и горячей деформации. Был предложен следующий механизм влияния кальция на структуру и свойства сплава 1420 [1]:

1) кальций модифицирует структуру слитков, способствуя формированию недендритной зеренной структуры с размером зерна 30...80 мкм;

2) кальций образует нерастворимую фазу, которая кристаллизуется в виде эвтектики $\alpha_{\text{ТВ, р-р}} + \text{Al}_4\text{Ca}$ (Ba, Cu, Mg) с благоприятной морфологией и высокой поверхностной активностью. Благодаря последней на частицах фазы адсорбируются натрий, повышающий горячеломкость сплава, и другие примеси, присутствующие на границах зерен (калий, сера, хлор) [2].

В результате кальций как микролегирующей элемент в количестве 0,04 % был включен в химический состав сплава 1420 [1].

Используя этот опыт, кальций выбран в качестве микролегирующей добавки к сплаву АВ системы Al—Mg—Si.

Исследовано влияние кальция на фазовый состав, зеренную структуру и текстуру листов. Для установления влияния легирующей добавки кальция на формирование текстуры был проведен анализ текстурных компонент, формирующихся в листах в поверхностной части и на глубине 1/4 по толщине.

Основной особенностью прямых полюсных фигур листов, закаленных после выдержки при температуре 530 °С после нагрева в селитровой ванне, является наличие сильного центрального максимума, соответствующего кубической текстуре, которая формируется обычно в процессе рекристаллизации.

Обнаружено систематическое изменение интенсивности кубического компонента при варьировании содержания кальция, указывающее на возможность регулирования текстуры, и, соответственно, штампуемости изучаемых листов за счет введения в качестве легирующей добавки кальция [3].

Оценивая влияние легирующей микродобавки кальция как модифицирующего компонента, сдерживающего развитие собирательной рекристаллизации, следует отметить, что он может, как и другие щелочноземельные металлы группы II, проявить себя в качестве поверхностно-активного элемента. Не исключено также, что легирующие добавки кальция, как фазообразующего компонента, приводят

к образованию дисперсных частиц избыточных интерметаллидных фаз или неорганических соединений, способствующих зарождению новых зерен.

Цель работы — исследование эксплуатационных, коррозионных свойств и технологичности при холодной деформации листов сплава В-1341, микролегированных кальцием в диапазоне концентраций 0,05...0,14 % мас.

Материал и методика проведения исследований. Влияние эксплуатационных нагревов на механические и коррозионные свойства листов сплава В-1341 определяли на полуфабрикате толщиной 3,0 мм следующего химического состава: 0,83...0,95 % Si; 0,6...0,68 % Mg; 0,30...0,35 % Cu; 0,12...0,14 % Ca, в состоянии Т1 (нагрев под закалку в селитровой ванне до 530 °С, выдержка 5 мин, охлаждение в воде + искусственное старение при 170 °С, 14 ч).

Были получены листы с рекристаллизованной структурой и размером зерна 55...100 мкм, что отвечает требованиям, гарантирующим надежную работу алюминиевых сплавов в авиационных конструкциях [4—7]. Механические свойства листов при нормальной, повышенной и пониженной температурах определяли в соответствии с действующими стандартами.

Также исследовали влияние эксплуатационных нагревов 100...200 °С с выдержками 10...500 ч.

Результаты исследований и их обсуждение. Металлографические исследования показали, что исследуемые листы сплава В-1341 имеют структуру со средним размером зерна на уровне 35...45 мкм, которые вытянуты в направлении деформации при прокатке листов (рис. 1).

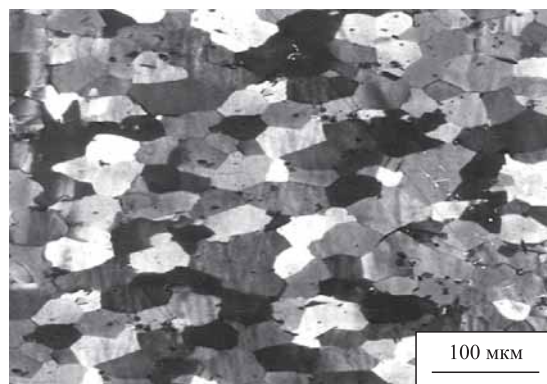


Рис. 1. Структура листов сплава В-1341 с содержанием кальция 0,12...0,14 %

Для улучшения способности к холодному формообразованию необходимо, чтобы в листах не протекали процессы собирательной рекристаллизации и роста зерен, структура должна быть мелкозернистая, прошедшая первичную рекристаллизацию. В результате определения степени рекристаллизации после закалки установлено, что в листах прошли процессы первичной рекристаллизации.

Исследование с применением светлопольных методик показало, что в структуре присутствуют дисперсоиды округлой формы, которые в ходе распада твердого раствора при старении являются дополнительными местами для гетерогенного зарождения неравновесных фаз. С помощью темнопольных методик определено, что во всех исследованных состояниях наблюдается интенсивный распад твердого раствора с образованием Q_1' ($Al_5Cu_2Mg_8Si_6$)-фазы и β' (Mg_2Si)-фазы.

Как отмечено выше, кальций влияет на текстуру листов — выравнивает кубическую текстуру по толщине листа, обеспечивая рекристаллизованную зеренную структуру. Это обеспечивает высокую технологичность в закаленном состоянии [7].

Механические свойства исследуемых листов при вырезке образцов в поперечном (П) и продольном (Д) направлениях по отношению к направлению прокатки были близкими, что свидетельствует об их изотропности (табл. 1).

Известно, что отсутствие анизотропии механических свойств листов во время холодной листовой штамповки обеспечивает равномерное распределение деформации во всех направлениях.

1. Механические свойства листов сплава В-1341Т1 в зависимости от направления вырезки образца

Направление вырезки образца	σ_B	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$
	МПа		
Д	330...335	305...310	13,5...17,5
15°	330...340	300...305	13,0...15,0
30°	335...340	300...310	12,0...15,0
45°	330...335	305...315	14,0...16,0
60°	335...340	300...310	13,0...15,0
75°		305...310	14,0...15,0
П	330...340	300...305	13,5...17,0

Механические свойства листов сплава В-1341Т1 при различных температурах приведены в табл. 2. При снижении температуры испытания до $-70^\circ C$ пластичность листов сплава В-1341Т1 сохраняется, о чем свидетельствует постоянство значений относительного удлинения. При температурах испытаний выше $100^\circ C$ кратковременные прочностные характеристики листов несколько снижаются, а относительное удлинение повышается. В целом листы в интервале температур от -70 до $+200^\circ C$ характеризуются хорошим сочетанием прочности и пластичности, что позволяет рекомендовать их для использования в изделиях, работающих в этом температурном интервале.

Результаты испытаний на длительную прочность и ползучесть листов сплава В-1341Т1 представлены на рис. 2. Видно, что с повышением температуры от 100 до $150^\circ C$ исследуемые характеристики снижаются, однако сохраняются при этом на достаточно высоком уровне.

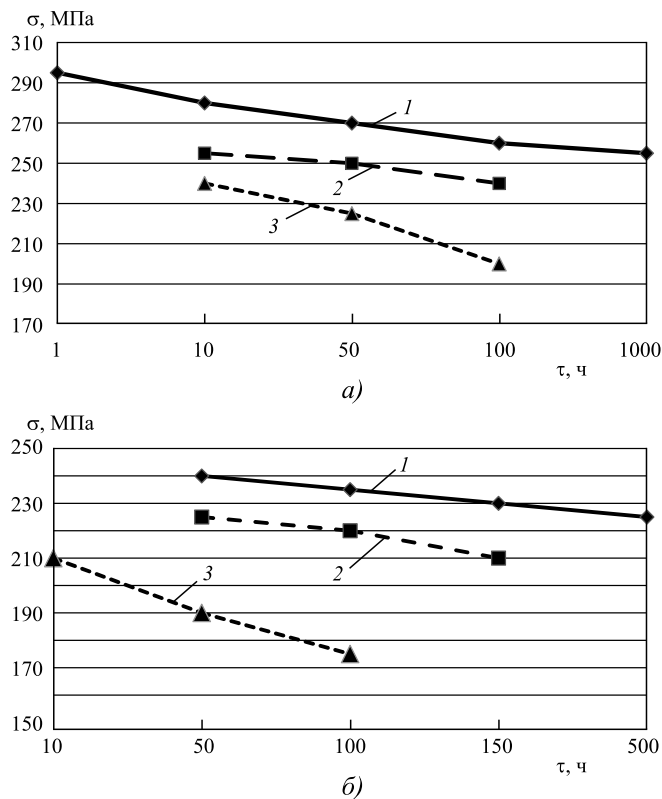


Рис. 2. Длительная прочность (а) и напряжения течения при ползучести, обеспечивающие остаточную деформацию 0,2 %, (б) холоднокатаных листов толщиной 3,0 мм из сплава В-1341Т1 при различных температурах испытания: 1 — $100^\circ C$; 2 — $125^\circ C$; 3 — $150^\circ C$

2. Механические свойства холоднокатаных листов из сплава В-1341Т1 при различных температурах испытания

Температура испытаний, °С	Направление вырезки образцов	$\sigma_{\text{пр}}$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{\text{в}}$	$\delta_5, \%$
		МПа			
-70	П	—	$\frac{301...347}{325}$	$\frac{360...366}{364}$	$\frac{14...17}{15}$
20	Д	$\frac{267...282^*}{275}$	$\frac{292...326}{309}$	$\frac{339...359}{348}$	$\frac{15...21}{18}$
	П	$\frac{252...278}{270}$	$\frac{276...322}{303}$	$\frac{349...370}{357}$	$\frac{15...18}{17}$
100	Д	$\frac{256...272}{265}$	$\frac{293...313}{303}$	$\frac{317...331}{325}$	$\frac{17...23}{19,5}$
	П	$\frac{252...261}{256}$	$\frac{286...291}{288}$	$\frac{314...317}{315}$	$\frac{18...18}{18}$
125	Д	$\frac{245...270}{261}$	$\frac{273...293}{288}$	$\frac{301...318}{313}$	$\frac{18...21}{19,3}$
	П	$\frac{245...268}{257}$	$\frac{289...292}{291}$	$\frac{305...311}{309}$	$\frac{17...20}{18}$
150	Д	$\frac{233...239}{236}$	$\frac{268...276}{272}$	$\frac{303...313}{307}$	$\frac{20...24}{22}$
	П	$\frac{238...248}{242}$	$\frac{270...278}{273}$	$\frac{289...293}{291}$	$\frac{18...21}{19}$
175	П	—	$\frac{235...260}{251}$	$\frac{271...283}{278}$	$\frac{18...23}{21}$
200	П	—	$\frac{237...264}{244}$	$\frac{260...277}{267}$	$\frac{18...20}{19}$

* В числителе приведены минимальное и максимальное значения, в знаменателе — среднее значение.

Известно, что эксплуатационные нагревы могут существенно изменить свойства сплава, особенно коррозионную стойкость. По изменению свойств после дополнительных нагревов уточняют допустимую температурную область возможного использования сплава. В табл. 3 и 4 приведены данные по влиянию дополнительных нагревов до 100...150 °С на механические и коррозионные свойства листов сплава В-1341Т1.

Свойства листов сплава В-1341Т1 ($\sigma_{\text{в}}$, $\sigma_{0,2}$, δ , K_{CU} и $a_{\text{ТУ}}$) после дополнительных нагревов практически не изменяются (см. табл. 3), что свидетельствует об их высокой стабильности.

Коррозионная стойкость листов из сплава В-1341Т1 с регламентированной структурой находится на уровне коррозионной стойкости листов стандартного сплава марки АВ. При этом критическое напряжение при постоянной нагрузке в поперечном направлении для обоих сплавов равно 245 МПа. Дополнительные

нагревы не оказывают влияния на склонность листов сплава В-1341Т1 к межкристаллитной коррозии (МКК), коррозионному растрескиванию (КР), потере механических свойств при испытании на общую коррозию, но при этом на 1 балл увеличивается склонность к расслаивающей коррозии (РСК) и отмечается рост скорости коррозии, достигающей максимальных значений после дополнительного нагрева до 100 °С с выдержкой 500 ч (см. табл. 4).

Концентраторы напряжений K_f могут существенно снижать прочность алюминиевых сплавов и разрушение может произойти при низких напряжениях. Критерием чувствительности материала к концентрации напряжений служит отношение временного сопротивления разрыву надрезанного и гладкого образца ($\sigma_{\text{в}}^{\text{H}}/\sigma_{\text{в}}$). Коэффициент концентрации напряжений определяется геометрией надреза. Для оценки чувствительности к концентрации напряжений были испытаны образцы из листов

3. Механические свойства сплава В-1341Т1 после дополнительных нагревов (поперечное направление)

Режим нагрева	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ_5	δ_{10}	Ударная вязкость	
					КСУ	с предварительно наведенной трещиной $a_{т,у}$
	МПа		%		кДж/м ²	
100 °С, 100 ч	$\frac{353...362}{357}$	$\frac{265...303}{280}$	$\frac{17...19}{18}$	$\frac{14...16}{15}$	$\frac{130...139}{134}$	—
100 °С, 500 ч	$\frac{351...363}{357}$	$\frac{270...317}{298}$	$\frac{16...20}{18}$	$\frac{13...15}{14}$	$\frac{131...134}{132}$	$\frac{64...66}{65}$
125 °С, 100 ч	$\frac{350...358}{354}$	$\frac{283...300}{291}$	$\frac{19...19}{19}$	$\frac{13...16}{15}$	$\frac{128...147}{139}$	—
150 °С, 10 ч	$\frac{353...361}{356}$	$\frac{279...283}{281}$	—		—	
150 °С, 50 ч	$\frac{349...363}{354}$	$\frac{287...319}{304}$	$\frac{15...18}{17}$	$\frac{12...14}{13}$	—	$\frac{62...63}{62}$

4. Склонность к различным видам коррозии сплава В-1341Т1 после воздействия дополнительных нагревов

Режим нагрева	Склонность				Потери механических свойств, %			Скорость коррозии, г/(м ² ·сут)
	к МКК, мм	к РСК, балл	к КР		σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	
			σ , МПа	τ , сут				
—	0,2	2—3	274	16	0	0	24	0,12
150 °С, 50 ч			245	>45				
100 °С, 100 ч		2	274	24	0	0	17	0,13
125 °С, 100 ч		3—4	245	>45				
100 °С, 500 ч			0,175	274				
			254	>45				

сплава В-1341Т1, имеющие острые боковые надрезы ($K_t = 4,2$), и образцы с центральным круглым отверстием ($K_t = 2,6$).

Приведенные в табл. 5 результаты испытаний показывают, что листы сплава В-1341Т1 практически не чувствительны к концентратору напряжений при $K_t = 2,6...4,2$ ни в продольном, ни в поперечном направлениях.

Поскольку между характеристиками статической и конструкционной прочности не существует определенной зависимости, для листов из сплава В-1341Т1 помимо статической прочности было оценено сопротивление усталости, в том числе *малоцикловая усталость* (МЦУ), *скорость роста трещины усталости* (СРТУ) и вязкость разрушения, характеризующаяся критическим коэффициентом интен-

сивности напряжений при плоском напряженном состоянии (K_c^y) [8].

Как видно из рис. 3, разброс между максимальными и минимальными значениями СРТУ листов незначителен, что свидетельствует об их стабильности. На основании анализа кривых усталости установлено, что предел выносливости гладких образцов составляет 167 МПа, а образцов с отверстием — 118 МПа (рис. 4). МЦУ образца с отверстием равна 200 кцикл при $\sigma_{max} = 157$ МПа (табл. 6).

В табл. 6 приведены сравнительные характеристики, обеспечивающие конструкционную прочность листов сплавов В-1341Т1 и АМг6М. Получено, что сплав В-1341Т1 имеет практически такие же значения K_c^y и СРТУ, полученные на образцах шириной 100 мм, как и сплав

5. Чувствительность листов из сплава В-1341Т1 к концентрации напряжений при осевом растяжении

Форма образца и концентратор напряжений K_t	Направление вырезки образцов	σ_B^H , МПа	σ_B^H/σ_B
С центральным круглым отверстием, $K_t = 2,6$	Д	357	1,02
	П	348	0,98
С боковыми острыми надрезами, $K_t = 4,2$	Д	346	0,99
	П	363	1,03

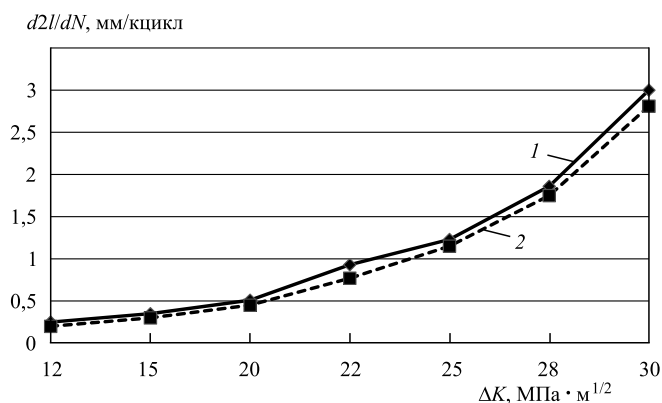


Рис. 3. СРТУ ($d2l/dN$) холоднокатаных листов толщиной 3,0 мм из сплава В-1341Т1 ($B = 100$ мм; $R = 0,1$; $f = 40$ Гц; $\sigma_{max} = 98$ МПа):

1 — максимальное значение; 2 — минимальное значение; ΔK — коэффициент интенсивности напряжений; B — ширина образца; R — коэффициент асимметрии цикла; f — частота нагружения; σ_{max} — максимальное напряжение цикла

АМг6М, однако по малоциклового усталости превосходит его в 3 раза. В отличие от сплава В-1341Т1, имеющего высокую технологичность при холодной деформации, листы из сплава АМг6М при холодной деформации за счет быстрого упрочнения утрачивают технологичность, а также в них проявляется склонность к образованию полос Чернова—Людерса, которые ухудшают качество поверхности изделия.

Для получения деталей из листов сплава В-1341 используют процессы гибки. Для отработки процесса гибки листовых заготовок сплава В-1341 толщиной 1,5 мм применяли полосы шириной 150 мм и длиной 345 мм.

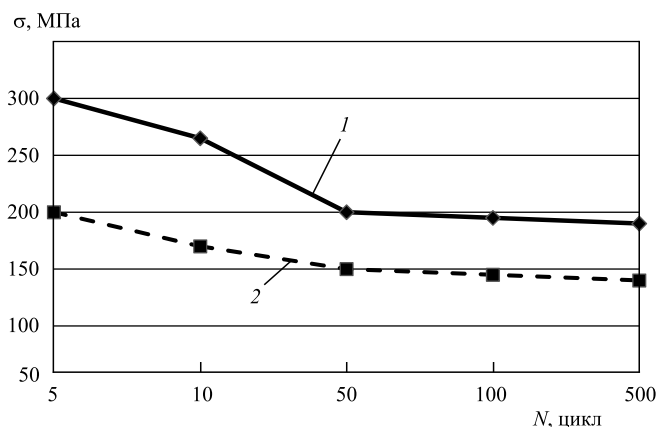


Рис. 4. Кривые усталости холоднокатаных листов сплава В-1341Т1 при осевом растяжении ($R = 0,1$; $f = 40$ Гц):

1 — гладкий образец, $K_t = 1,1$; 2 — образец с отверстием, $K_t = 2,6$

Эксперименты показали, что вальцовка обечайки из листа сплава В-1341Т1 возможна в свежезакаленном состоянии и после искусственного старения (рис. 5).

Гибку профилей из листов сплава В-1341 осуществляли стесненным изгибом по традиционной схеме [5, 7]. Указанным методом гибки получены типовые профили (рис. 6) из сплава В-1341Т1, которые после гибки практически не проявляли пружинения.

Высокая технологичность при холодном формообразовании листов из сплава В-1341 позволяет сделать вывод о перспективности изготовления из них различных деталей и узлов с применением холодной листовой штамповки. Об этом свидетельствует получение высококачественных полупатрубок, являющихся

6. Механические и усталостные свойства сплавов АМг6М и В-1341Т1

Сплав	K_c^y , МПа·м ^{1/2}	МЦУ, цикл при $\sigma_{max} = 157$ МПа	СРТУ, мм/кцикл ($\Delta K = 31,2$ МПа·м ^{1/2})	σ_B^H/σ_B при $K_t = 4,2$ (надрез)
АМг6М	50	65	3,80	0,75
В-1341Т1	53	200	2,88	1,0

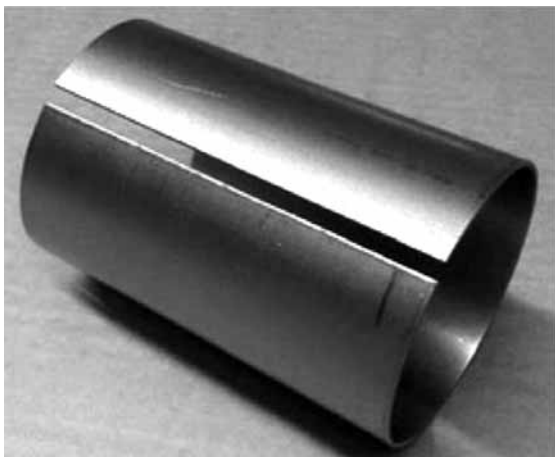


Рис. 5. Обечайка диаметром 100 мм после вальцовки из листа толщиной 1,5 мм алюминиевого сплава В-1341Т1

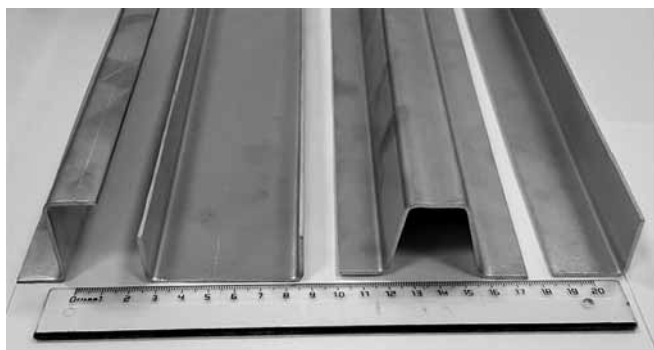


Рис. 6. Типовые тонколистовые профили из сплава В-1341Т1

элементами сварных тонкостенных патрубков сложной конфигурации (рис. 7).

В качестве примера для отработки технологии холодной листовой штамповки были выбраны сферические донышки (рис. 8) рас-



Рис. 7. Штампованные полупатрубки из сплава В-1341Т1 толщиной 1,5 мм



Рис. 8. Сферические донышки после холодной штамповки из листовой заготовки сплава В-1341Т1 после обрезки технологического припуска

ширительных бачков диаметром 100 мм. Для штамповки таких донышек используются заготовки в виде дисков диаметром 200 мм. Диаметр заготовки учитывает припуск на фиксацию детали в штампе с последующей его обрезкой на дисковых ножницах.

Установлено, что из листов сплава В-1341Т1 методом холодной штамповки в штампах могут быть получены качественные детали.

Для получения панелей с гофрами, элементами жесткости, а также сложных профилей из листов алюминиевых сплавов применяют метод гибки эластичным пуансоном. Используя технологическую оснастку и режимы гибки, соответствующие технологическому процессу изготовления деталей толщиной 1,5 мм из сплава Д16Т, из листов сплава В-1341Т1 были получены панели (рис. 9).



Рис. 9. Панели с элементами жесткости, полученные из листа сплава В-1341Т1 толщиной 1,8 мм методом гибки эластичным пуансоном

Выводы

1. Микролегирование кальцием сплава В-1341 способствует регулированию текстуры в листах, выравнивая кубическую текстуру по толщине и обеспечивая однородную равноосную равномерную зеренную структуру. Легирующая добавка кальция приводит к образованию дисперсных частиц, обеспечивающих мелкозернистую рекристаллизованную структуру, препятствует росту зерна в листах.

2. Кальций практически не влияет на уровень механических свойств листов вне зависимости от ориентации образцов относительно оси прокатки. Однако при максимальном содержании кальция (0,14 %) в состоянии полной термической обработки наблюдается повышение прочностных характеристик при сохранении высокой пластичности.

3. Наиболее высокие значения прочности и условного предела текучести листов сплава В-1341 достигаются после искусственного старения по режиму: температура нагрева 170 °С с выдержкой 10...14 ч.

4. Листы из сплава В-1341 обладают повышенной в сравнении с листами сплавов серии 5000 технологической пластичностью при холодной листовой штамповке, при этом не нагартовываются при деформации, тогда как при изготовлении деталей из сплавов АМг2, АМг4 и АМг6 требуется проводить межоперационные отжиги из-за наклепа материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Грушко О.Е., Овсянников Б.В., Овчинников В.В.** Алюминиево-литиевые сплавы: металлургия, сварка, металловедение. М.: Наука, 2014. 295 с.
2. **Влияние** примесей щелочных и щелочноземельных металлов на структуру и свойства сплава 1420 / О.Е. Грушко, Л.М. Шевелева, И.П. Жегина, С.Т. Басюк // Вопросы авиационной науки и техники. 1988. Вып. 2. С. 10—19.
3. **Структура** и способность к выдавке листов из сплавов системы Al—Mg—Si, содержащих легирующие добавки кальция / В.Ф. Шамрай, О.Е. Грушко, Л.М. Шевелева, Д.Д. Самсонов // Перспективные материалы. 2004. № 5. С. 16—22.
4. **Фридляндер И.Н., Берстенов В.В., Ткаченко Е.А. и др.** Влияние термической обработки и деформации на величину зерна и механические свойства сплавов типа дуралюмин // МиТОМ. 2003. № 7. С. 3—6.
5. **Повышение** штампуемости листов из сплава системы Al—Mg—Si, применяемых при холодной штамповке / М.А. Гуреева, О.Е. Грушко, В.В. Овчинников, В.Ф. Шамрай // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2007. № 4. С. 20—27.
6. **Свойства** листов из высокотехнологичного сплава В-1341 / И.Н. Фридляндер, О.Е. Грушко, Л.М. Шевелева, С.Ф. Данилов // МиТОМ. 2004. № 12. С. 3—6.
7. **Грушко О.Е., Овчинников В.В., Алексеев В.В. и др.** Структура, способность к выдавке и свариваемость листов из сплава типа "Авиаль", легированного кальцием // МиТОМ. 2007. № 7. С. 15—22.
8. **Каблов Е.Н., Грушко О.Е., Гриневиц А.В.** "Летающий металл" — в автомобилестроении // Грузовик. 2005. № 10. С. 16—24.

Ольга Евгеньевна Грушко, д-р техн. наук;
Борис Владимирович Овсянников, канд. техн. наук;
Виктор Васильевич Овчинников, д-р техн. наук,
 vikov1956@mail.ru