

Машиностроение Mechanical engineering

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 620.22: 630.377.42

doi: 10.30987/2782-5957-2026-6-4-19

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА СТАЛЬНЫХ ЛИСТОИЗДЕЛИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО РАЗЛИЧНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ СХЕМАМ

Дамир Тамасович Сафаров^{1✉}, Татьяна Владимировна Соченко², Фарит Камильевич Мифтахов³, Виктор Валерьевич Каблуков⁴, Талгат Фаузатович Исхаков⁵

^{1,2,3,4,5} Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, Республика Татарстан, Набережные Челны, Россия

¹ safarov-dt@mail.ru.; <http://orcid.org/0000-0002-8297-4524>

² Gimazetdinova.chulpan@mail.ru

^{3,5} mtk_ineka@mail.ru

⁴ ferrum-ferrum@inbox.ru

Аннотация

Цель исследования: выявление причин разрушения угловых элементов кронштейна транспортной тележки механизма сдвижной крыши в процессе их эксплуатации.

Задача, решению которой посвящена статья: выявление влияния способа получения заготовки вырубкой на прессе и лазерной резки на качество гибки угловых элементов при радиусах, близких к толщине листопроката и угле изгиба на 90° по отношению к верхней поверхности основания кронштейна.

Методы исследования: визуальный и измерительный контроль, профилографический анализ, спектральный анализ, металлографический анализ, измерение твердости и микротвердости.

Новизна работы: исследование влияния вырубки и лазерной резки заготовок из листопроката на возникновение дефектов в процессе их гибки при радиусе, близком к толщине листа и угле изгиба, близком к 90°.

Результаты исследования: шероховатость поверхности после лазерной резки ($R_z=8,032$ мкм в зоне выдува), в 3...4 раза меньше, чем после вырубки ($R_z=21,34$ мкм в зоне долома). Глубина зоны термического влияния после лазерной резки 0,17-0,23 мм. Утонение материала в месте гибки 0,25

мм. Микротвердость слоя по глубине изменяется от 170-204 HV₁₅, сердцевины 94 НВ. Марка стали деталей полученных вырубкой 20кп, лазерной резки 08кп. На основе анализа применения различных методов исследования установлено негативное влияние лазерной резки заключающееся в возникновении дефектов после гибки металла с радиусом равным толщине листа при угле гибки элементов на 90°. После гибки деталей, заготовки которых изготовлены лазерной резкой, выявлены значительные микротрещины глубиной до 0,7 мм, а в полученных вырубкой наблюдаются единичные микротрещины глубиной до 0,15 мм.

Выводы: причинами поломок в эксплуатации угловых элементов кронштейна является холодная пластическая деформация литой структуры, боковой поверхности угловых элементов, в месте гибки листа и приводящая к возникновению микротрещин, являющимися концентраторами напряжений. В местах гибки по краям листовой заготовки детали не рекомендуется использовать лазерную резку.

Ключевые слова: листопрокат, холодная гибка, вырубка, лазерная резка, трещины, шероховатость, микроструктура, твердость.

Ссылка для цитирования:

Сафаров Д.Т. Исследование качества стальных листоизделий, изготовленных по различным технологическим схемам / Д.Т. Сафаров, Т.В. Соченко, Ф.К. Мифтахов, В.В. Каблуков, Т.Ф. Исхаков // Транспортное машиностроение. – 2026. - № 6. – С. 4-19. doi: 10.30987/2782-5957-2026-6-4-19.

Original article
Open Access Article

STUDY OF THE QUALITY OF STEEL PLATES MANUFACTURED USING VARIOUS TECHNOLOGIES

Damir Tamasovich Safarov^{1✉}, Tatyana Vladimirovna Sochenko², Farit Kamilevich Miftakhov³, Viktor Valeryevich Kablukov⁴, Talgat Fauzatovich Iskhakov⁵

^{1,2,3,4,5} Naberezhnye Chelny Institute (branch of Kazan Federal University), Republic of Tatarstan, Naberezhnye Chelny, Russia

¹ safarov-dt@mail.ru.; <http://orcid.org/0000-0002-8297-4524>

² Gimazetdinova.chulpan@mail.ru

^{3,5} mtk_ineka@mail.ru

⁴ ferrum-ferrum@inbox.ru

Abstract

The study objective is to identify the causes of destructing angular elements of the transport trolley bracket of the sliding roof mechanism during their operation.

The task to which the paper is devoted is to identify the effect of the method of obtaining a die cutting and laser cutting on the bending quality of angular elements at radii close to the thickness of the sheet and a bending angle of 90° relative to the upper surface of the bracket base.

Research methods: visual and measuring control, profilographic analysis, spectral analysis, metallographic analysis, hardness and micro hardness measurements.

The novelty of the work: the study of the effect of chipping and laser cutting of blanks from sheet metal on the occurrence of defects during their bending at a radius close to the thickness of the sheet and a bending angle close to 90°.

The study results: the surface roughness after laser cutting ($R_z=8.032$ microns in the blow area) is 3-4 times less than after chipping ($R_z=21.34$ microns in the rupture area). The depth of the thermal impact area after laser cutting is 0.17-0.23 mm. The thinning of the

material at the bending point is 0.25 mm. The micro-hardness of the layer varies in depth from 170-204 HV₁₅ up to the core which is 94 NV. The steel grade of the parts obtained by chipping is 20KP, while laser cutting is 08KP. Based on the analysis of applying various research methods, the negative effect of laser cutting is found out, which consists in the occurrence of defects after bending metal with a radius equal to the thickness of the sheet at a bending angle of 90°. After bending the parts, which blanks are made by laser cutting, significant micro-cracks up to 0.7 mm deep are revealed and single microcracks with a depth of up to 0.15 mm are observed after chipping.

Conclusions: the causes of breakdowns in the operation of the angular elements of the bracket are cold plastic deformation of the cast structure, lateral surface of the angular elements, at the bending point of the sheet and leading to microcracks, which are stress concentrators. It is not recommended to use laser cutting at the bending points along the edges of the workpiece.

Keywords: sheet metal, cold bending, chipping, laser cutting, cracks, roughness, microstructure, hardness.

Reference for citing:

Safarov DT, Sochenko TV, Miftakhov FK, Kablukov VV, Iskhakov TF. Study of the quality of steel plates manufactured using various technologies. *Transport Engineering*. 2026;6:4-19. doi: 10.30987/2782-5957-2026-6-4-19.

Введение

Для изготовления многих деталей машиностроения применяется листопрокат, в том числе и высокопрочный, из различных марки сталей. Зачастую конструктивное исполнение штампованных деталей содержит элементы сложной геометрии с малыми радиусами перехода, качество которых необходимо обеспечить в процессах холодной пластической деформации. Выявлению и устранению дефектов изделий, получаемых из листового проката посвящены множество публикаций. Например, в исследовании [1] рассматриваются дефекты изготовления деталей цилиндрической формы. Авторы выделяют в основном де-

фекты, связанные с отклонениями геометрии изделия и дефекты поверхности в виде рисок и трещин. В [2] выполнены теоретические расчеты гибки толстостенной детали, и показано, что несмотря на то, что расчетные значения гибки не превышают предельных при штамповке все же возникают трещины и задиры на боковых поверхностях. В работах [3, 4] приведены данные о высоком риске возникновения трещин в высокопрочном листовом прокате при изгибе с радиусом равным толщине металла. Там же рассмотрены результаты штамповки с подогревом металла, которые показывают, что повышается пластичность

металла и увеличивается угол изгиба деталей без возникновения трещин. Также авторы рассматривают метод изгиба со сжатием заготовки до напряжения текучести, где гибке подвергался лист толщиной 4 мм. В результате, по данным рентгеноскопического анализа, удается избежать трещин, возникающих в месте гибки листа. Однако во всех публикациях не рассматривается вопрос качества кромки листа и его влияние на образование трещин в детали

Для обеспечения качества конечного изделия необходимо обеспечить технологичность используемого металлопроката. Для листопрката, подвергаемого холодной листовой штамповке его технологичность обеспечивается при соблюдении требований к свойствам материала и конструктивному исполнению деталей. Свойства материала должны соответствовать по требованию показателя отношения предела текучести к пределу прочности. Это соотношение не должно превышать до 0,8. Конструктивное исполнение изделий, должна удовлетворять требованиям [6, 7], которые устанавливают ограничения на радиус гибки плоских заготовок. При толщине материала менее 6 мм радиус изгиба может быть равен толщине материала; а при толщине материала более 6 мм, но менее 12 мм, радиус изгиба обычно в 1,5 раза больше толщины материала. В случае, когда толщина материала более 12 мм радиус изгиба должен быть не менее 3-х кратного значения толщины материала. В отдельных источниках эти требования уточняются. Например, в [7, 9] приводятся результаты более детального анализа критерия возникновения трещин при гибке, учитывающие соотношение радиуса внутреннего и внешнего деформируемых участков изгибаемой детали. Оно не должна превышать величину в 1,83 при предельной величине деформации сдвига $\phi \leq 0,3$.

Соответствие листопрката требованиям технологичности могут проверяться в процессах входного контроля листопрката проведением механических испытаний с определением предела текучести и прочности, относительного удлинения, твердости и химического состава стали.

Результаты стандартизованных исследований могут дополняться авторскими методиками, например [10] штампуемость определяется по результатам измерений микротвердости структурных составляющих штампуемого материала или проверкой листопрката на трещиностойкость [5] с применением специальных образцов для испытаний для построения диаграммы предельных деформаций [11, 12, 13]. Технологичность конструкции детали проверяется в результате моделирования методом конечных элементов. Входными данными служат как правило справочные данные по марке листопрката и его механических свойств. Примерами моделирования могут служить работы, приведенные в [14, 15, 16] в которых рассмотрены результаты моделирования процессов листовой штамповки различных деталей с применением различных критериев разрушения, в том числе по критерию Коккрафта-Латама. Результатом моделирования являются карты распределения напряжений по поверхности деталей.

Разрабатываются подходы к автоматизации и моделирования раскроя листовых материалов [17, 18, 19, 20], учитывающих форму детали, ее функциональное назначение, массу, толщину металла, сложность конфигурации, наличие деловых отходов штамповки и др. характеристики. Подход позволяет решать задачи повышения коэффициента использования материала, а также улучшать планирование обработки деталей в производстве, но эти методы не ставят задачу прогнозирования дефектов в операциях листовой штамповки в зависимости от технологии раскроя материала.

Следует отметить, что приняты процедуры моделирование в системах автоматизированного проектирования на основе конечных элементов не учитывает фактического действия производственных факторов – фактический свойств листопрката, анизотропии, применяемого смазочного состава, износа штамповой оснастки. Не рассматривается и влияние качества поверхности кромок листопрката на итоговый результат моделирования после разделительных операций вырубке и лазерной

резки. Возникает необходимость в экспериментальных исследованиях по уточнению действия производственных факторов на качество изготовления деталей методами холодной пластической деформации. В работе поставлена цель – исследовать ка-

чество кронштейнов роликовой тележки изготовленных из заготовок (образцов), полученных вырубкой на прессе или при помощи лазерной резки при достижении геометрии штампованных элементов близких к критическим.

Материалы, модели, эксперименты и методы

Исследованию подвергались кронштейны роликовой тележки, входящие в состав механизма складывающейся крыши грузового полуприцепа. Деталь изготавливается из стального листопроката толщиной 3 мм. С одной стороны, деталь выполнена в виде элемента П-образного сечения (рис. 2 поз. 1), которой она вставляется в

поперечину, а с другой стороны присутствует отогнутая на 90° стенка. В конструкции детали выполнены отверстия, в которые устанавливаются ролики, а в средней части детали находятся угловые элементы (рис. 2 поз. 2) с выполненными внутри них отверстиями.

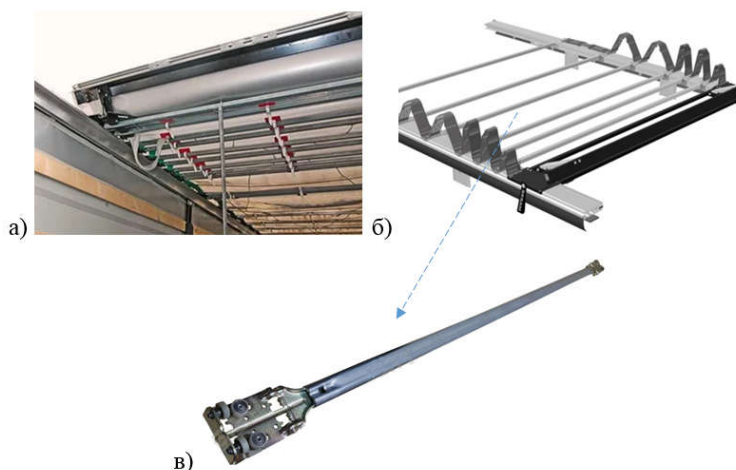


Рис. 1. Крыша сдвижная - а, механизм складной крыши полуприцепа - б, кронштейн роликовой тележки в сборе с поперечиной - в
Fig. 1. Sliding roof (a), semi-trailer folding roof mechanism (b), roller trolley bracket assembly with crossbar (c)

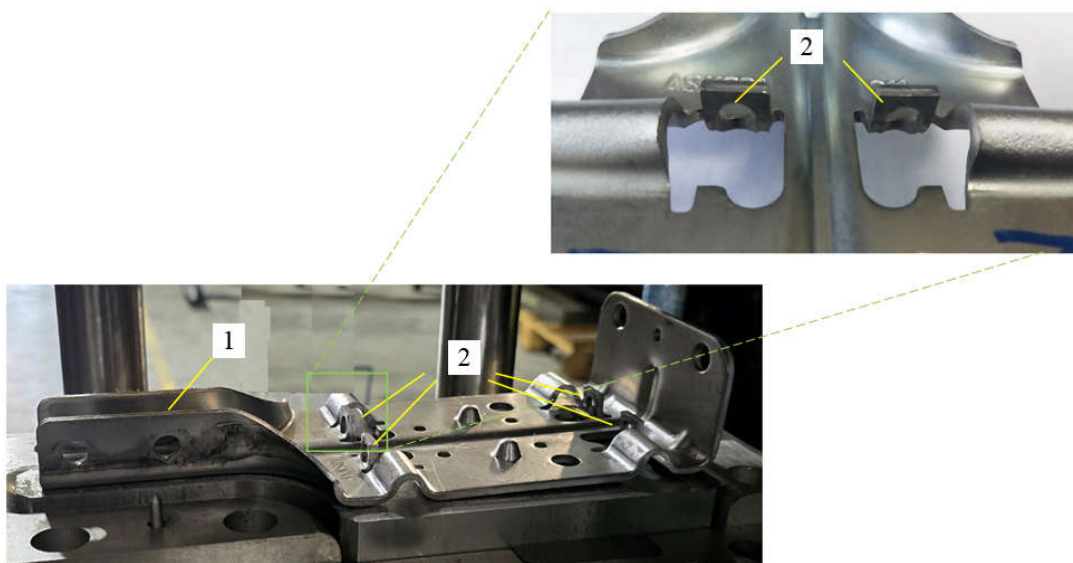


Рис. 2. Внешний вид детали «кронштейна роликовой» тележки, где 1 – бурт, 2 – угловые элементы
Fig. 2. Appearance of the "roller bracket" part of the trolley, where 1 is the flange and 2 are the corner elements

В эти отверстия вставляются спицы устройства подъема тента при его складывании. Деталь изготавливается холодной пластической деформацией в нескольких операциях, каждая из которых выполняется штамповкой с перекладкой в нескольких ручьях. Заготовку для детали изготавливают на вырубном прессе или лазерной резкой, которая далее подвергается штамповке для формообразования ребер, придающих жесткость детали и базовых отверстий, далее следует гибочная операция, которая выполняет формообразование П-образного бурта и угловых элементов. Гибка элементов выполняется на угол 90 градусов относительно верхней поверхности основания кронштейна.

Деталь имеет значительный запас прочности и в процессе эксплуатации при общем исправном механизме ее поломки не наблюдается. Слабым местом в детали являются угловые элементы. В процессе эксплуатации при нарушении процесса складывания полотна крыши может происходить их разрушение в месте радиусного изгиба, поэтому исследование направлено в основном на обеспечение качества их гибки. Ограничивающим условием обеспечения ее бездефектности является радиус гибки, равный толщине металла, что не соответствует требованиям технологичности гибки этого элемента. Детали в производстве изготавливаются по различ-

Результаты

Измерения геометрических размеров, по которым можно судить о точности вырубки заготовки и гибки угловых элементов выполнялась по схеме, приведенной на рис. 3.

При номинальном размере овального отверстия в 6 мм до гибки, после ее выполнения размеры d изменяется в угловых элементах полученных вырубкой в пределах от 6,60 мм до 6,65 мм ($\Delta d = 0,05$ мм) размер g изменяется в пределах от 6,14 мм до 6,39 мм ($\Delta g = 0,25$ мм).

У угловых элементов, полученных лазерной резкой размеры d изменяется от 6,54 до 6,61 мм ($\Delta d = 0,07$ мм), размер g

ным технологическим схемам как вырубкой, так и лазерной резкой.

Для выявления влияния факторов процесса, влияющих на возникновение дефектов гибки выполнялось комплексное исследование углового элемента детали после штамповки с использованием следующего исследовательского и вспомогательного оборудования: Макросъемка проводилась на стереомикроскопе МБС 2, оснащенным программным комплексом Левенгук, для профилографического исследования применялся профилограф ф. *Mahr M 400*. Пробоподготовка выполнялась с использованием установки электроэрозионной резки металла *DK 7745* и отрезного станка «*Diskotom*». Металлографический анализ выполнялся с применением микроскопов *IM7200* (Япония) и Неофот 32, оснащенным программным анализатором *SIAMS 800*. Твердость измерялась на твердомере «ТШ-2М», спектральный анализ выполнялся с использованием спектрометров «*Spektrolab*» и «*CXR-950*», и анализатора серы и углерода *ELTRA GS-800*. Измерения геометрических параметров детали выполнялось на высотемере ф. *Mahr Digimahr 817 CLM* и при помощи электронного штангенциркуля ф. *Mahr 16 ER*.

В работе исследовались детали, заготовки для которых были изготовлены вырубкой и лазерной резкой.

изменяется от 6,5 мм до 6,7 мм ($\Delta g = 0,2$ мм). Изменение формы отверстия после гибки свидетельствует о наличии растягивающих усилий, действующих в поперечном и продольном направлении. Высотный размер m углового элемента детали, полученной из вырубленной заготовки изменяется в диапазоне от 11,90 мм до 12,90 мм ($\Delta m = 1,0$ мм), а после лазерной резки в пределах от 11,34 до 11,87 мм ($\Delta m = 0,53$ мм) при номинальном его значении в 12,60 мм. Изменение высотного размера свидетельствует о значительно различающихся радиусах гибки углового элемента.

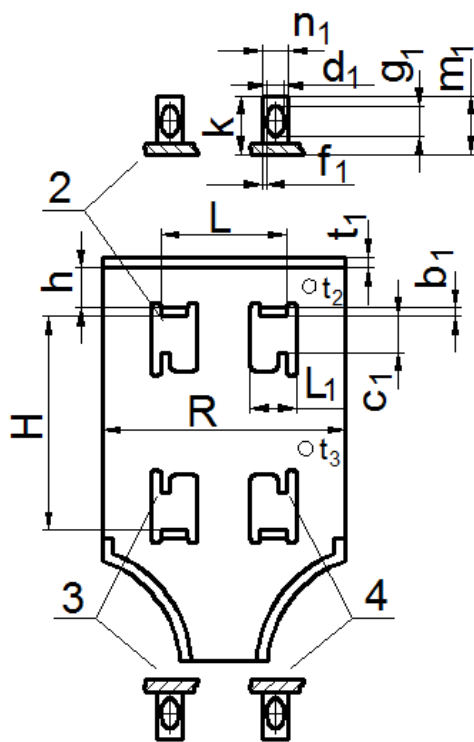


Рис. 3. Схема измерений геометрических размеров кронштейна
 Fig. 3. Measurement scheme of the bracket's geometric dimensions

На рис. 4 и 5 приведены фотографии кромок угловых элементов кронштейнов, заготовки которых получены вырубкой и лазерной резкой. У кронштейнов, полученных вырубкой по кромкам формируется заусенец, после лазерной резки заусенца не наблюдается, однако на внешней поверхности имеются видимые трещины.

Профилографическое исследование выполнено по боковым поверхностям детали с применением профилографа. После вырубки на боковой поверхности можно выделить зоны среза и зону долома после лазерной резки – зону рабочего плавления и выдува [23]. Профиль шероховатости регистрировался в перечисленных выше зонах. На заготовках после вырубки характер впадин и вершин заостренный, после лазерной резки, вследствие оплавления, вершины и впадины округленные. По данным модуля обработки данных профиля найдены следующие параметры шероховатости боковой поверхности у кронштейна тележки из стали 20кп после вырубки:

– в зоне среза: $Ra=0,544$ мкм, $Rz=2,485$ мкм, $Rmax=3,122$, $RSm=341$;

– в зоне долома принимают следующие значения: $Ra=4,036$ мкм, $Rz=21,34$ мкм, $Rmax=28,05$, $RSm=326$

Параметры шероховатости боковой поверхности после лазерной резки:

– в зоне рабочего плавления: $Ra=0,541$ мкм $Rz=3,085$ мкм, $Rmax=4,555$ мкм, $RSm=250$ мкм;

– в зоне выдува: $Ra=1,849$ мкм $Rz=8,032$ мкм, $Rmax=11,84$ мкм, $RSm=203$ мкм.

Микронеровности являются концентраторами напряжений в условиях значительных напряжений, возникающих при пластической деформации металла. После лазерной резки величина шероховатости в три или четыре раза меньше, чем после вырубки.

Для определения содержания химических элементов в работе использован аттестованные и сертифицированные спектрографы. Для проведения анализа выполнен пробоподготовка двух образцов (рис. 13) с зачисткой их поверхностей от защитного покрытия. Результаты контроля приведены в табл. 4 и 5.

Таблица 1

Значения геометрических размеров после гибки угловых элементов кронштейна,
полученных из вырубленных заготовок

Table 1

*Geometric dimensions after bending the angle elements of the bracket obtained
from chipped blanks*

Условное обозначение размера	Прочие размеры	№ углового элемента			
		1	2	3	4
b , мм		2,97	2,96	3,03	3,00
c , мм		11,68	11,98	12,78	12,38
L , мм		18,60	18,51	18,58	18,65
n , мм		12,42	12,53	12,58	12,59
d , мм		6,55	6,55	6,54	6,61
f , мм		2,34	2,29	2,64	2,29
g , мм				6,14	6,39
m , мм		12,51	11,90	12,90	12,39
		№ точки измерения			
		1	2	3	
t , мм		2,97	3,02	3,11	
h , мм	11,95				
H , мм	99,4				
R , мм	89,5				

Таблица 2

Значения геометрических размеров после гибки угловых элементов кронштейна,
полученных из заготовок после лазерной резки

Table 2

*Geometric dimensions after bending the angle elements of the bracket obtained
from blanks after laser cutting*

Условное обозначение размера	Прочие размеры	№ углового элемента			
		1	2	3	4
b , мм		3,04	3,00	2,99	2,99
c , мм		11,94	11,96	12,39	12,45
L , мм		17,33	17,49	17,29	17,75
n , мм		10,49	11,13	10,76	11,25
d , мм		6,60	6,60	6,61	6,65
f , мм		2,42	2,75	2,39	2,53
g , мм				6,70	6,50
m , мм		11,34	11,35	11,87	11,79
		№ точки измерения			
		1	2	3	
t , мм		3,07	3,04	3,08	
h , мм	12,85				
H , мм	99,32				
R , мм	89,39				

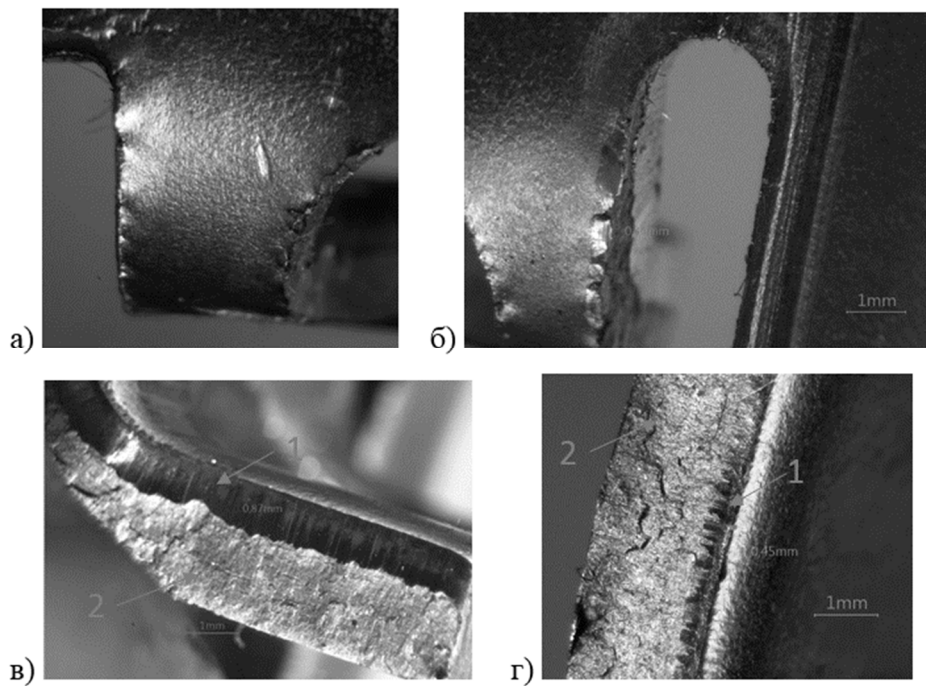


Рис. 4. Боковая поверхность листа кронштейна, полученной из вырубленной заготовки:
 а, б – заусенцы после гибки, в – боковая поверхность углового
 элемента, г – боковая поверхность на прямолинейном участке,
 где 1 – зона среза, 2 – зона долома

*Fig. 4. Side surface of the bracket sheet obtained from a cut-out blank:
 a, b) burrs after bending, c) side surface of the corner element,
 d) side surface in a straight section, where 1 is the cut-out zone and 2 is the break-out zone*

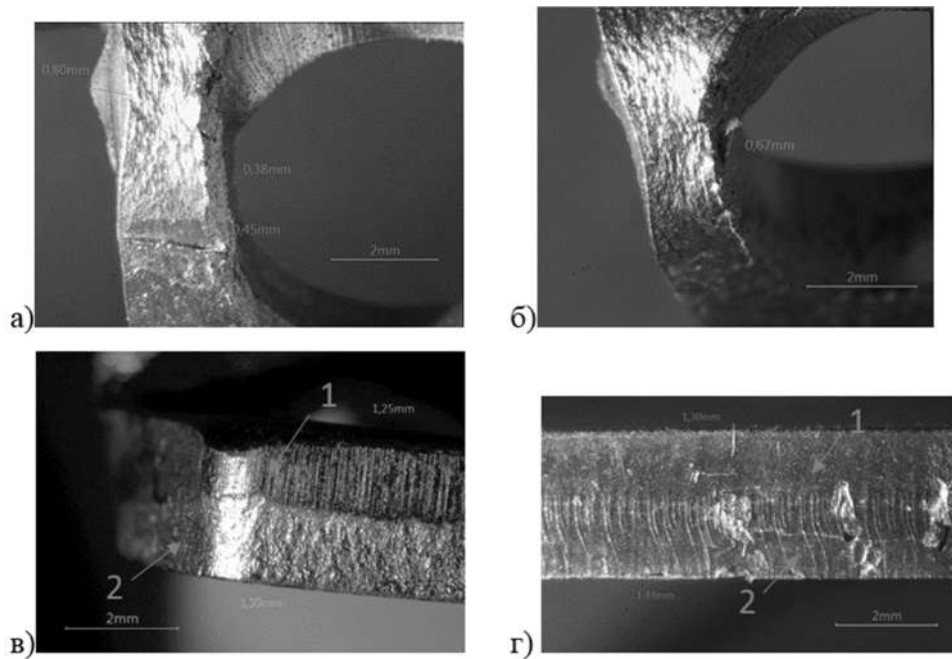


Рис. 5. Боковая поверхность листа кронштейна, полученного из заготовки после лазерной резки:
 а, б – заусенцы после гибки, в) повернуть углового элемента, г) повернуть на прямолинейном
 участке, где 1 – зона рабочего плавления, 2 – зона выдува

*Fig. 5 Side surface of the bracket sheet obtained from the blank after laser cutting:
 a, b) burrs after bending, c) surface of the corner element, d) surface on a straight section,
 where 1 is the working melting zone and 2 is the blowing zone*

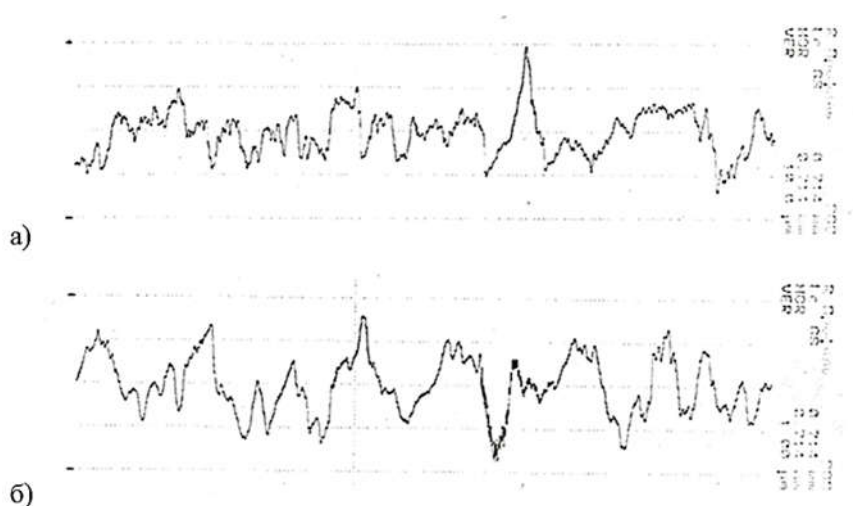


Рис. 6. Профилограммы боковой поверхности листозаготовки после вырубки, где а - зона долома; б - зона среза
 Fig. 6. Profile diagrams of the lateral surface of a sheet blank after cutting, where a) is the break zone, and b) is the cut zone

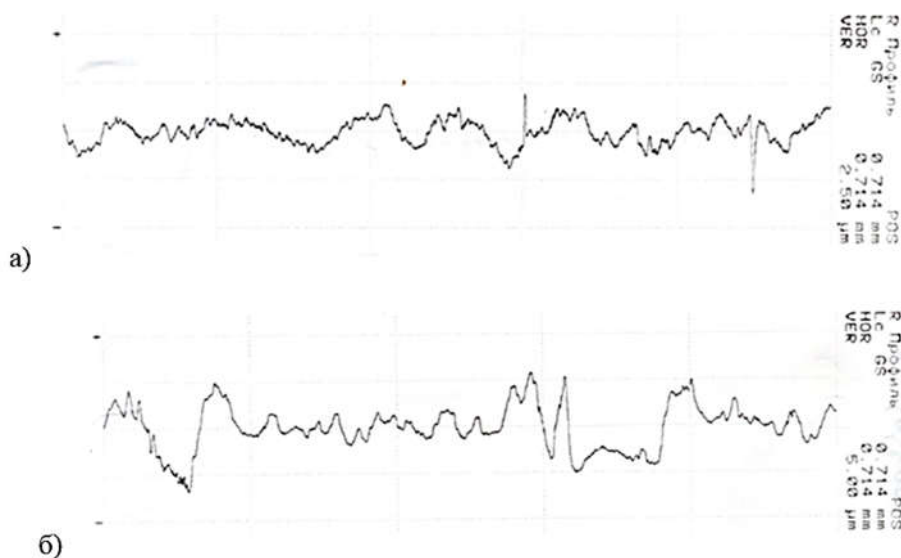


Рис. 7. Профилограммы боковой поверхности листозаготовки после вырубки, где а – зона рабочего плавления, б – зона выдува
 Fig. 7. Profile diagrams of the side surface of the sheet blank after cutting, where a) is the working melting zone, and b) is the blowing zone

По содержанию химических элементов материал кронштейна соответствует подвергнутого вырубке соответствует марке стали 20кп (табл. 4), подвергнутого лазерной резки соответствует марке стали 08 кп (табл. 5).

Для проведения металлографического исследования выполнена пробоподготовка. Угловые элементы запрессованы в

полимерные образцы, поверхность металлических образцов подвергалась шлифовки и полировки с последующим травлением (рис. 8). Образцы можно исследовать как с наружной, так и по внутренней стороне изгиба, а также можно выполнять измерения радиуса изгиба углового элемента.

Таблица 4

Содержание химических элементов материала кронштейнов изготовленных
из вырубных заготовок

Table 4

The content of chemical elements of the bracket material made from chipped blanks

№	Название химического элемента	Массовая доля по ГОСТ, %	Содержание элемента, мас. %	
			Спектрометр CXR-950	Спектрометр «Искролайн»
1	Углерод (C)	0,17–0,24	0,20	0,204
2	Кремний (Si)	0,07	0,052	0,053
3	Марганец(Mn)	0,25–0,5	0,387	0,391
4	Фосфор (P)	0,035	0,011	0,012
5	Сера (S)	0,04	0,011	0,011
6	Хром (Cr)	0,25	0,032	0,033
7	Никель (Ni)	0,3	0,004	0,004
8	Молибден (Mo)		0,012	0,011
9	Ванадий (V)		0,006	0,007
10	Медь (Cu)	0,3	0,002	0,002
11	Магний (Mg)		< 0,001	---
12	Титан (Ti)		0,005	0,005
13	Алюминий (Al)		0,033	0,035
14	Мышьяк (As)	0,08	< 0,001	---
15	Кобальт (Co)		0,002	---
16	Ниобий (Nb)		0,001	0,001
17	Свинец (Pb)		0,004	---
18	Вольфрам (W)		0,004	---
19	Железо (Fe)		ост. до 100%	ост. до 100%

Таблица 5

Содержание химических элементов материала кронштейнов,
полученных из заготовок после лазерной резки

Table 5

*The content of chemical elements of the bracket material obtained
from blanks after laser cutting*

№	Название химического элемента	Массовая доля по ГОСТ сталь 08пс, %	Массовая доля по ГОСТ сталь 10кп, %	Содержание элемента, мас. %	
				Спектрометр CXR-950	Спектрометр «Искролайн»
1	Углерод (C)	0,05–0,12	0,07–0,14	0,086	0,084
2	Кремний (Si)	≤ 0,03	≤ 0,07	0,041	0,042
3	Марганец(Mn)	0,25–0,5	0,25–0,5	0,144	0,182
4	Фосфор (P)	≤ 0,035	≤ 0,030	0,007	0,008
5	Сера (S)	≤ 0,04	≤ 0,035	0,006	0,009
6	Хром (Cr)	≤ 0,1	≤ 0,15	0,023	0,016
7	Никель (Ni)		≤ 0,3	0,005	0,008
8	Молибден (Mo)			0,007	0,004
9	Ванадий (V)			0,006	0,008
10	Медь (Cu)	≤ 0,3	≤ 0,3	0,004	0,003
11	Магний (Mg)			< 0,001	--
12	Титан (Ti)			0,004	0,002
13	Алюминий (Al)			0,030	0,032
14	Мышьяк (As)	--		< 0,001	--
15	Кобальт (Co)			0,008	0,007
16	Ниобий (Nb)			0,002	0,003
17	Свинец (Pb)			0,010	0,012
18	Вольфрам (W)			0,001	0,001
19	Железо (Fe)			ост. до 100 %	ост. до 100 %

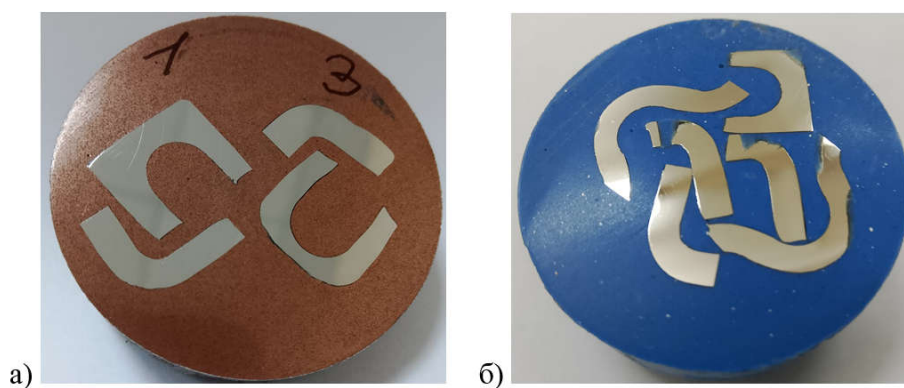


Рис. 8. Шлифы для металлографического исследования угловых элементов кронштейнов, изготовленных из деталей, полученных: а – вырубкой, б – лазерной резкой
 Fig. 8. Sections for metallographic examination of the corner elements of the brackets made from parts obtained by: a) cutting, b) laser cutting

Металлографический анализ кронштейнов предусматривал исследование степени загрязнения стали неметаллическими включениями в соответствии с ГОСТ 2778-70, а также микроструктуры, размера зерна и твердости на образцах, вырезанных из зоны угловых элементов и прилегающей к ней боковой части детали.

На рис. 9, 10 представлены цифровые изображения микроструктуры образцов. Микроисследование стали проводилось на травленной 4 %-ным раствором HNO_3 . Для получения фотографий микроструктуры использовали металлографический комплекс из оптического микроскопа *NEOFONT-32* и программного анализатора *SIAMS 800*.

В результате выполнения металлографического анализа выявлено, что размер зерна материала кронштейна, изготовленного из стали 10пс, подвергнутого вырубке (рис. 9), соответствует 10...11 баллу, загрязнённость по неметаллическим включениям до 3 баллу, в структуре металла выявлена и присутствует полосчатость. Обезуглерожженный слой с поверхности не наблюдается. В поверхностном слое на изгибе углового элемента с внутренней и внешней стороны обнаружены микротрещины глубиной от 0,1 до 0,15 мм. Радиус изгиба по внутренней поверхности, измеренный с применением стереомикроскопа МБС 2, по угловым элементам изменяется в пределах 2,56...2,89 мм, толщина металла угловых элементов около 3,15 мм, в ме-

сте гибки 2,85 мм, таким образом утонение металла в месте гибки 0,25 мм.

Твёрдость $\sim 116 \text{ HB } 5/750$, что соответствует пределу прочности материала 43 кгс/мм^2 (430 МПа), микротвердость - $94,3 \text{ HV}_{15}$.

Металлографическим анализом образцов (рис. 10) от кронштейна, изготовленного из стали 08пс (10кп) выявлено, что используемая сталь имеет низкую загрязненность оксидами. На рис. 10 приведена микроструктура стали основы детали, а также вид и глубина дефекта на ее поверхности. Данные дефекты являются следствием изменения структурного состояния и свойств на поверхности наследуемых от технологии лазерной резки. Микроструктура поверхностного слоя существенно отличается от структуры сердцевины. В поверхностном слое на изгибе углового элемента с внешней стороны (рис. 12) обнаружены микротрещины глубиной от 0,3 до 0,7 мм. В отдельных дефектах обнаружены выкрашивание материала. Радиус изгиба по внутренней поверхности, измеренный с применением стереомикроскопа МБС 2 по угловым элементам изменяется в пределах 2,67...2,94 мм.

Материал имеет твердость $\sim 94 \text{ HB}$, микротвердость поверхностного слоя $\sim 170\text{-}204 \text{ HV}_{15}$, что является следствием закалки материала поверхностного слоя после лазерной резки.

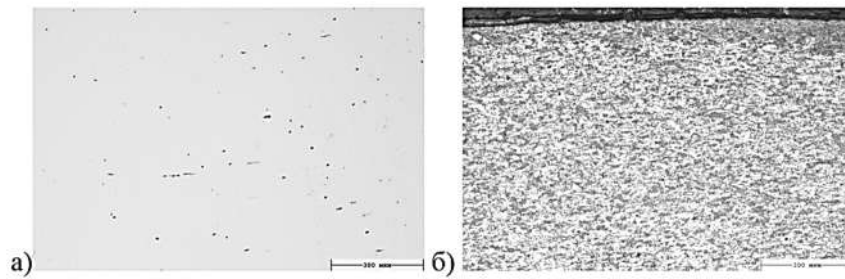


Рис. 9. Микроструктура материала кронштейна после вырубки:
 а – не травлено $\times 100$; б – сердцевина $\times 100$, травлено HNO_3
 Fig. 9. Microstructure of the bracket material after felling:
 a) not etched $\times 100$, b) core $\times 100$, etched with HNO_3

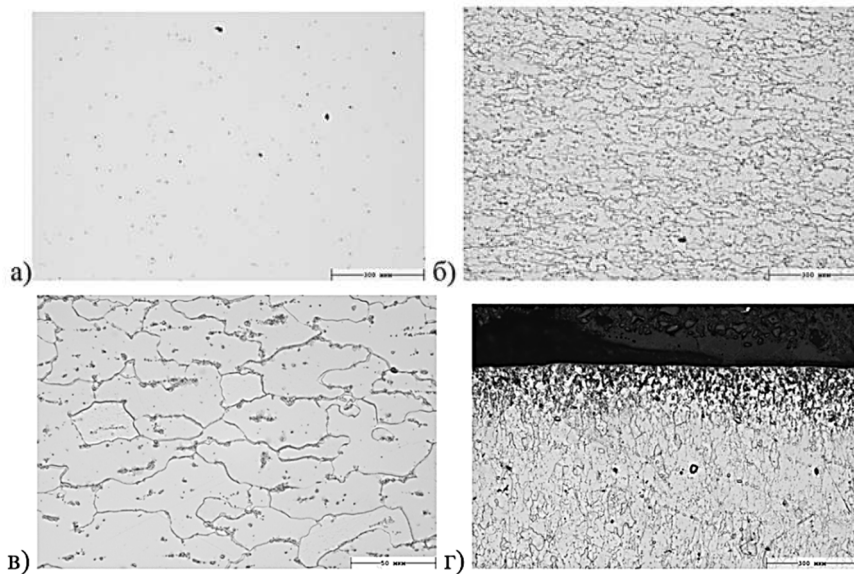


Рис. 10. Микроструктура материала кронштейна после лазерной резки:
 а – не травлено $\times 100$; б – сердцевина $\times 100$, травлено HNO_3 ,
 в – сердцевина $\times 500$, г – поверхность $\times 100$
 Fig. 10. Microstructure of the laser cutting bracket material:
 a) not etched $\times 100$, b) core $\times 100$, etched with HNO_3 , c) core $\times 500$, d) surface $\times 100$

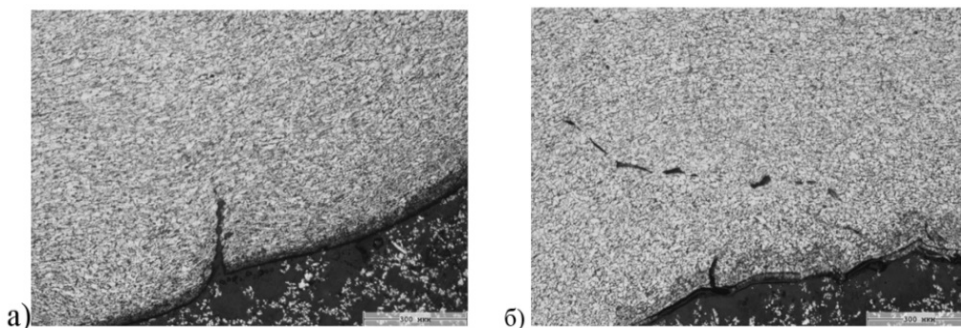


Рис. 11. Микроструктура поверхностного слоя углового элемента после вырубки $\times 100$,
 травлено HNO_3 с дефектами: а – с внешней стороны, глубиной 0,12 мм,
 б – с внутренней стороны, глубиной 0,1 мм
 Fig. 11. Microstructure of the surface layer of the corner element after cutting $\times 100$,
 etched with HNO_3 with defects: a) from the outside, 0,12 mm deep, b) from the inside, 0,1 mm deep

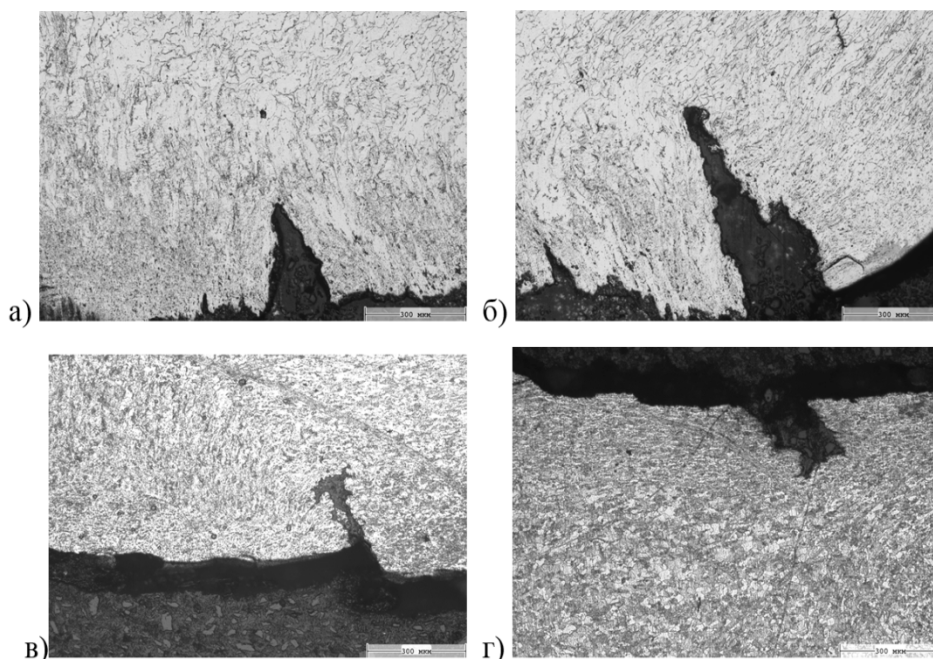


Рис. 12. Микроструктура поверхностного слоя углового элемента с внешней стороны после лазерной резки $\times 100$, травлено HNO_3 , с дефектами глубиной:
а – 0,32 мм; б – 0,67 мм; в – 0,3 мм, г – 0,26 мм

*Fig. 12. Microstructure of the surface layer of the corner element from the outside after laser cutting $\times 100$, etched with HNO_3 , with defects of depth:
a) 0,32 mm, b) 0,67 mm, c) 0,3 mm, and d) 0,26 mm*

Обсуждение/Заключение

Проведенные исследования гибки угловых элементов кронштейна с радиусом, близким к толщине металла, выявили наличие трещин после гибки заготовок как после вырубки, так и после лазерной резки. После вырубки микротрещины имеют глубину до 0,15 мм, после лазерной резки наблюдается их большее количество глубиной до 0,7 мм. По краям и дну микротрещин обнаружены следы выкрашивания материала, что связано с наличием литой закаленной структуры поверхностного

слоя, возникающей после термического воздействия лазерного луча в процессе резки металла.

Установлено, что использование заготовок, вырезанных лазером из листопродуката, не дает преимуществ по отношению к заготовкам полученных путем их вырубки на прессе. В некоторых случаях лазерная вырезка заготовок приводит даже к получению деталей более низкого качества особенно по кромкам в местах холодной гибки металла.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мальцев, Н. Р. Дефекты гибки, возникающие при изготовлении корпусных элементов нефтезаводского оборудования / Н. Р. Мальцев, М. А. Бикмухаметова, А. М. Забатурин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2025. № 5. С. 242-249
2. Верхов, Е. Ю. Анализ и разработка технологии изготовления гнутых толстолистовых деталей / Е. Ю. Верхов, Ю. А. Морозов // Вестник Московского государственного открытого университета. Москва. Серия: Техника и технология. 2011. № 4. С. 14-19
3. Томило, В. А. Исследование процесса гибки высокопрочных сталей / В. А. Томило, М. Л. Нестерович // Литье и металлургия. 2020. № 3. С. 71-78.
4. Томило, В. А. Технология и инструмент для гибки листов из высокопрочных сталей / В. А. Томило, М. Л. Нестерович // Литье и металлургия. 2020. № 1. С. 50-55
5. Особенности и опыт применения высокопрочных сталей для холодной листовой штамповки деталей автомобилей / В. И. Астащенко, Д. Т. Сафаров, Т. В. Швеева, Т. В. Соченко // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2024. Т. 26, № 3. С. 74-81

6. ОСТ 26.260.758-2003. Конструкции металлические. Общие технические требования / М., 2003. 86 с.
7. ОСТ 1 00286-78. Радиусы сгиба листовых материалов из сталей. Взамен 19СТ53 (в части сталей). М., 1978. 5 с.
8. Исследование способности высокопрочной стали к пластической деформации при изгибе на угол 90° / М. В. Чукин, П. П. Полецков, Д. Ю. Алексеев [и др.] // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2016. Т. 9, № 8. С. 1326-1332
9. Разработка оценочной методики определения ресурса пластичности в процессах листовой гибки / Ю. А. Морозов, Е. Ю. Верхов, Е. В. Крутина, А. А. Фролов // В мире научных открытий. – 2015. – № 12-3(72). – С. 882-896
10. Патент № 2568887 С1 Российская Федерация, МПК G01N 33/20, G01N 3/40. Способ определения пригодности стали для холодной пластической деформации : № 2014148855/15 : заявл. 03.12.2014 : опубл. 20.11.2015 / В. И. Асташенко, Э. Р. Галимов, А. И. Швеев [и др.] заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Казанский (Приволжский) федеральный университет" (ФГАОУ ВПО КФУ)
11. Феоктистов, С. И. Оценка верхнего и нижнего уровней допустимых деформаций при изготовлении листовых и тонкостенных деталей на основе диаграммы предельных деформаций / С. И. Феоктистов, И. К. Андрианов // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2023. № 86. С. 136-148
12. Диаграмма предельных деформаций при горячей листовой штамповке металлов. Обзор моделей материала, критериев вязкого разрушения и стандартных испытаний / И. Э. Келлер, Д. С. Петухов, А. В. Казанцев, В. Н. Трофимов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. 2018. Т. 22, № 3. С. 447-486
13. Вилимок, Я. А. Сравнительный анализ предельной штампуемости при двусосном растяжении / Я. А. Вилимок, А. К. Евдокимов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. № 7. С. 71-75
14. Козлов, Е. Д. Компьютерное моделирование гибки детали «Скоба» / Е. Д. Козлов, А. В. Боткин // Молодежный вестник УГАТУ. 2024. № 1(30). С. 60-65
15. Ключков, В. Н. Моделирование технологического процесса гибки листовых деталей на этапе проектирования штампового оборудования / В. Н. Ключков, М. Э. Подымако, И. А. Колесов // Вестник Брестского государственного технического университета. 2024. № 2(134). С. 98-103
16. Нестеренко, Е. С. Моделирование процесса гибки детали "уголок" с угломгиба больше 90 градусов в усовершенствованном штампе с упругими элементами / Е. С. Нестеренко, М. И. Щербов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 6. С. 380-383
17. Федорина, Е. В. Кластер номенклатуры листоштамповочных деталей при проектировании раскроя металлопроката / Е. В. Федорина, И. Ф. Дьяков // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2018. № 1(25). С. 203-219
18. Федорина, Е. В. Моделирование технологических процессов раскроя с целью минимизации затрат / Е. В. Федорина, И. Ф. Дьяков, В. Н. Кокорин // Упрочняющие технологии и покрытия 2016. № 4. С. 39-43
19. Амбос, Э. Экономика сырья и материалов / Э. Амбос, А. Нойбауер, Ю. Освальд и др. М.: Металлургия, 1989. 255 с.
20. Бабаев, Ф. В. Оптимальный раскрой материалов с помощью ЭВМ / Ф. В. Бабаев. / М.: Машиностроение, 1982. – 168 с.
21. Патент № 2695715 С1 Российская Федерация, МПК В23К 26/38. Способ формирования упрочненного приповерхностного слоя в зоне лазерной резки деталей : № 2018140047 : заявл. 14.11.2018 : опубл. 25.07.2019 / И. В. Минаев, Н. Н. Сергеев, И. В. Тихонова [и др.] ; заявитель общество с ограниченной ответственностью научно-производственное предприятие «ТЕЛАР» (ООО НПП «ТЕЛАР»). 10 с.

REFERENCES

1. Maltsev NR, Bikmukhametova MA, Zabaturin AM. Bending defects arising in the manufacture of housing elements of oil refinery equipment. Izvestiya Tula State University. Technical Sciences. 2025;5:242-249.
2. Verkhov EYu, Morozov YuA. Analysis and development of technology for manufacturing bent thick-sheet parts. Bulletin of Moscow State Open University. Series: Engineering and Technology. 2011;4:14-19.
3. Tamila VA, Nesterovich ML. Research of high strength steels bending. Foundry Production and Metallurgy. 2020;3:71-78.
4. Tamila VA, Nesterovich ML. Bending technology of high-strength steel sheets and tools for its realization. Foundry Production and Metallurgy. 2020;1:50-55.
5. Astashchenko VI, Safarov DT, Shveeva TV, Sochenko TV. Features and experience of using high-strength steels for cold sheet stamping of automobile parts. Bulletin PNRPU. Mechanical Engineering, Materials Science. 2024;26(3):74-81.
6. OST 26.260.758-2003. Metal structures. General technical requirements. Moscow; 2003.
7. OST 1 00286-78. Bending radii of sheet materials made of steels. Moscow; 1978.

8. Chukin MV, Poletskov PP, Alekseev DYU. Study of the ability of high-strength steel to plastic deformation when bending at the angle of 90°. Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. 2016;9(8):1326-1332.
9. Morozov YuA, Verkhov EYu, Krutina EV, Frolov AA. Development of an evaluation technique for determining the plasticity resource in sheet bending processes. V Mire Nauchnikh Otkrytiy. 2015;12-3(72):882-896.
10. Astashchenko VI, Galimov ER, Shveev AI. Method for determining the suitability of steel for cold plastic deformation. RF Patent No. 2568887 C1 МПК G01N 33/20, G01N 3/40. 20 Nov 2015.
11. Feoktistov SI, Andrianov IK. Assessment of the upper and lower levels of permissible strains in the manufacture of sheet and thin-walled parts based on the forming limit diagram. Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Matematika i Mekhanika. 2023;86:136-148.
12. Keller IE, Petukhov DS, Kazantsev AV, Trofimov VN. The limit diagram under hot sheet metal forming. A review of constitutive models of material, viscous failure criteria and standard tests. Journal of Samara State Technical University, Ser. Physical and Mathematical Sciences. 2018;22(3):447-486.
13. Vilimok YaA, Evdokimov AK. Comparative analysis of limit stampability under biaxial tension. Izvestiya Tula State University. Technical Sciences. 2014;7:71-75.
14. Kozlov ED, Botkin AV. Computer modeling of bending of the part "Staple" Molodezhnyj Vestnik UGATU. 2024;1(30):60-65.
15. Klochkov VN, Podymako ME, Kolesov IA. Modeling of the technological process of bending sheet parts at the stage of designing stamping equipment. Vestnik of Brest State Technical University. 2024;2(134):98-103.
16. Nesterenko ES, Shcherbov MI. Simulation the bending process of a part with a bending angle greater than 90 degrees in an improved die with elastic elements. Izvestiya Tula State University. Technical Sciences. 2021;6:380-383.
17. Fedorina EV, Dyakov IF. Nomenclatural cluster of sheet stamping parts for designing metal cutting. Models, Systems, Networks in Economics, Technology, Nature and Society. 2018;1(25):203-219.
18. Fedorina EV, Kokorin VN. Process simulation of metal cutting order to minimize costs. Strengthening Technologies and Coatings. 2016;4:39-43.
19. Ambos E, Neubauer A, Oswald Yu. Economy of raw materials. Moscow: Metallurgiya; 1989.
20. Babaev FV. Optimal cutting of materials using a computer. Moscow: Mashinostroenie; 1982.
21. Minaev IV, Sergeev NN, Tikhonova IV. Method of forming a hardened near-surface layer in the area of laser cutting of parts. RF Patent No. 2695715 C1 25 Jul 2019.

Информация об авторах:

Сафаров Дамир Тамасович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Материалов, технологий и качества» Набережночелнинского института (филиала) Казанского (Приволжского) федерального университета тел. +7 (8552) 58-97-49, Scopus Author ID: 6603409746, AuthorID-РИНЦ 741369.

Соченко Татьяна Владимировна – научный сотрудник передовой инженерной школы Набережночелнинского института (филиала) Казанского (Приволжского) федерального университета тел.: +7 (8552) 58-95-26, Author ID РИНЦ 1235599.

Мифтахов Фарит Камильевич – ассистент кафедры «Материалов, технологий и качества» Набе-

Safarov Damir Tamasovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Materials, Technologies and Quality at Naberezhnye Chelny Institute (branch of Kazan Federal University); phone: +7 (8552) 58-97-49, Scopus Author ID: 6603409746, AuthorID-RSCI 741369.

Sochenko Tatyana Vladimirovna – Researcher at the Advanced Engineering School of Naberezhnye Chelny Institute (branch of Kazan Federal University); phone: +7 (8552) 58-95-26, The author ID of the RSCI is 1235599.

режночелнинского института (филиала) Казанского (Приволжского) федерального университета тел. +7 (8552) 58-99-66.

Каблуков Виктор Валерьевич – аспирант кафедры «Материалов, технологий и качества» Набережночелнинского института (филиала) Казанского (Приволжского) федерального университета тел. +7 (8552) 58-99-66.

Исхаков Талгат Фаузатович – аспирант кафедры «Материалов, технологий и качества» Набережночелнинского института (филиала) Казанского (Приволжского) федерального университета тел. +7 (8552) 58-99-66.

Miftakhov Farit Kamilyevich – Assistant of the Department of Materials, Technologies and Quality at Naberezhnye Chelny Institute (branch of Kazan Federal University); phone: +7 (8552) 58-99-66.

Kablukov Viktor Valeryevich – Postgraduate Student of the Department of Materials, Technologies and Quality at Naberezhnye Chelny Institute (branch of Kazan Federal University); phone: +7 (8552) 58-99-66.

Iskhakov Talgat Fauzatovich – Postgraduate Student of the Department of Materials, Technologies and Quality at Naberezhnye Chelny Institute (branch of Kazan Federal University); phone: +7 (8552) 58-99-66.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.**

Статья поступила в редакцию 16.02.2026; одобрена после рецензирования 05.05.2026; принята к публикации 27.05.2026. Рецензент – Нагоркин М.Н., доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 16.02.2026; approved after review on 05.05.2026; accepted for publication on 27.05.2026. The reviewer is Nagorkin M.N., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.

* * *
** ** **

***Продолжается подписка на научно-технический журнал
«Транспортное машиностроение» на 2026 год***

Подписку на журнал можно оформить, начиная с любого месяца, в почтовом отделении. Подписные индексы по интернет-каталогу «Пресса по подписке» – 80859 – https://www.akc.ru/itm/vestnik-bry_anskogo-gosudarstvennogo-tehnic_heskogo-universiteta/ и Объединенному каталогу «Пресса России» – 80859.

Стоимость подписки на минимальный срок – от 4846 руб.

Информация об опубликованных статьях регулярно направляется в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) – <https://www.elibrary.ru/contents.asp?titleid=79505>.

Сайт электронной редакции журнала: <https://bstu.editorum.ru/ru/nauka/journal/169/view>

E-mail: trans-eng@tu-bryansk.ru.

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук (категория К2) по группам научных специальностей:

2.5. Машиностроение (2.5.2; 2.5.3; 2.5.5; 2.5.6; 2.5.8),

2.6. Химические технологии, науки о материалах, металлургия (2.6.1; 2.6.17),

2.9. Транспортные системы (2.9.1; 2.9.3; 2.9.5).