



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК 620.174

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.042

EDN: SCVIIC

ВЫБОР ЛИСТОПРОКАТА ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ, УМЕНЬШАЮЩИЙ ВЕРОЯТНОСТЬ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ТРЕЩИН ПРИ ХОЛОДНОЙ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКЕ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Дамир Тамасович Сафаров ¹, Владимир Иванович Астащенко ²,
Татьяна Владимировна Соченко ⁴,

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

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

² astvi-52@mail.ru @mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8141-6021>

³ stv09@mail.ru

Аннотация. Выполнен обзор методов оценки штампуемости листопроката для повышения качества листовой штамповки ответственных несущих сложнопрофильных деталей большегрузного автомобиля. Разработана схема проведения испытаний на основе трехточечного нагружения образцов листопроката с выполненными искусственным концентратором напряжений, моделирующим естественные концентраторы после вырубки со следующими параметрами: глубина h 0,8 мм, угол α 55 °, радиус при вершине R 0,5 мм. Предложены показатели трещиностойкости: углы начала возникновения микротрещин α_{TM} и появления заметных трещин $\alpha_{ср.}$, $\alpha_{макс.}$ измеряемые в процессе проведения испытаний. Приведены результаты оценки трещиностойкости поступающих партий листопроката для выбора оптимальной партии, обеспечивающей отсутствие трещин на примере изготовления сложнопрофильной детали поперечина рамы большегрузного автомобиля. В ходе цеховых испытаний у листопроката, приводящей к краевым трещинам деталей сложной формы, найден диапазон изменения величины угла начала трещинообразования α_{TM} от 72 ° до 82 °, развития трещины $\alpha_{макс.}$ до длины 3 мм изменяется в интервале от 100 ° до 105 °. У листопроката, не приводящего к возникновению краевых трещин, α_{TM} изменяется от 93 ° до 98 °, угол развития трещины $\alpha_{макс.}$ до длины в 3 мм изменяется в интервале от 120 ° до 137 °. Разработан критерий выбора листопроката K_{acc} , величина которого рассчитывается по значениям углов $\alpha_{ср.}$, $\alpha_{макс.}$ при запасе по углу возникновения трещин в 10 °. По значениям критерия выполняется выбор листопроката для холодной пластической деформации деталей сложной формы. Величина критерия для каждой марки стали уточняется. Для листопроката из стали S550 толщиной 6 мм рекомендуется величина $K_{acc} > 1,2$. Предложена схема адаптации программы испытаний листопроката на трещиностойкость в процесс входного контроля при штамповке серийных деталей.

Ключевые слова: высокопрочная сталь испытания, критерий трещиностойкости, образец, листопрокат, холодная листовая штамповка, относительное удлинение.

Финансирование: работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторской диссертации и выполнению научно-исследовательских работ (соглашение № 12/2025-ПД-КФУ от 22.12.2025 г.).

Для цитирования: Сафаров Д. Т., Астащенко В. И., Соченко Т. В. Выбор листопроката из высокопрочных сталей, уменьшающий вероятность возникновения трещин при холодной листовой штамповке сложнопрофильных деталей // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 291–296. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.042. EDN: <https://elibrary.ru/SCVIIC>.

Original article

CHOICE OF SHEET METAL FROM HIGH-STRENGTH STEELS, WHICH REDUCES LIKELIHOOD OF CRACKS DURING COLD SHEET STAMPING OF COMPOSITE PARTS

Damir T. Safarov ¹, Vladimir I. Astashchenko ², Tatiana V. Sochenko ³

^{1, 2, 3} Naberezhnye Chelny Institute (branch) Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia

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

² astvi-52@mail.ru @mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8141-6021>

³ stv09@mail.ru

© Сафаров Д. Т., Астащенко В. И., Соченко Т. В., 2026

Abstract. A review of methods for evaluating the stampability of sheet metal for improving the quality of sheet stamping of responsible load-bearing composite parts of a heavy-duty vehicle has been performed. A test scheme has been developed for sheet metal rolling, with artificial stress concentrators simulating natural concentrators after cutting based on a three-point test. The results of assessing the crack resistance of incoming batches of sheet metal are considered to select the optimal batch that ensures the absence of cracks using the example of manufacturing a complex-profile part, the crossbar of the frame of a heavy-duty vehicle. Crack resistance indicators are proposed: the angles of the onset of microcracks α_{TM} and the appearance of noticeable cracks α_m, α_{max} , measured during testing. During shop tests, a range of changes in the angle of onset of cracking α_{TM} from 72° to 82° and crack development α_{max} was found for the sheet metal rolling machine, which leads to edge cracks in parts of complex shape. The length of 3 mm varies in the range from 100° to 105° . In a sheet-rolling machine that does not lead to the appearance of marginal cracks, α_{TM} varies from 93° to 98° , the angle of crack development α_{max} up to a length of 3 mm varies in the range from 120° to 137° . A criterion has been developed for choosing a K_{ac} sheet roll, the value of which is calculated from the values of the angles α_m, α_{max} with a margin of 10° for the angle of occurrence of cracks. According to the values of the criterion, a sheet roll is selected for cold plastic deformation of parts of complex shape. The value of the criterion for each steel grade is being specified. For sheet rolling made of S500 steel with a thickness of 6 mm, the recommended value is $K_{ac} > 1.2$. The scheme of adaptation of the test program of a rolled sheet for crack resistance in the process of input control during stamping of serial parts is given.

Keywords: high-strength steel testing, crack resistance criterion, sample, sheet metal, cold sheet stamping, elongation.

Funding: The work was carried out at the expense of a grant provided by the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan to higher education institutions, scientific and other organizations to support the development of human resources in terms of encouraging their researchers and academic staff to defend their doctoral theses and conduct research (agreement No. 12/2025-PD-KFU dated December 22, 2025).

For citation: Safarov, D. T., Astashchenko, V. I. & Sochenko, T. V. (2021). Choice of sheet metal from high-strength steels, which reduces the likelihood of cracks during cold sheet stamping of composite parts. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 291-296. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.042. EDN: <https://elibrary.ru/SCVIIC>.

ВВЕДЕНИЕ

В производственных условиях оценка штампуемости и технологичности листового проката направлены на определение соответствия листопрката требованиям стандартов по химическому составу, механическим свойствам, структуре и чистоте. На практике листопркат из высокопрочной стали, соответствующий по всем контролируемым параметрам и требованиям стандартов, может приводить к дефектам в операциях холодной пластической деформации сложнопровильных автомобильных деталей.

Пример такого дефекта в виде краевой трещины для детали «поперечина рамы» приведен на рис. 1. Деталь изготавливается из высокопрочной термомеханически упрочненной стали S550MC.

Поперечина рамы изготавливается в двух ручьях. В первом выполняется гибка плоской заготовки, во втором – окончательное формообразование детали. Краевая трещина возникает после формообразования детали во втором ручье. Основной причиной образования трещины является наличие на кромках концентраторов напряжений, образующихся после вырубных операций. Чистота кромок после вырубки зависит от наладки и качественного пуансона [1, 2]. Содержание различных методов по обеспечению штампуемости листопрката рассматривается в различных литературных источниках.

Например, в [3–6] штампуемость обеспечивается путем рационального выбора марки металла и термической обработки [7, 8]. В [9] отсутствие дефектов штамповки добиваются за счет проведения предварительного проведения экспериментов с варьированием параметров штамповочных переходов с дальнейшим выбором оптимальных параметров. В [10] для обеспечения качества штамповки предлагается способ производственного контроля, заключающийся в выборочном контроле листов, склонных к расслоению, приготовлению шлифов и металлографическому анализу на слоистость микроструктуры.

В [11] в дополнение к предыдущему методу для оценки штампуемости предлагается выполнять измерения микротвердости отдельных структурных составляющих. По разности микротвердости выполняют

заключение о штампуемости металла. Следует отметить, трудоемкость методик, требующих либо проведения производственных экспериментов, либо лабораторной подготовки образцов.

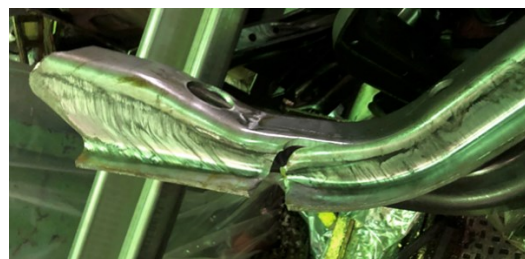


Рисунок 1 – Дефект холодной листовой штамповки сложнопровильной детали «поперечина рамы» большегрузного автомобиля в виде краевой трещины

Figure 1 – A defect in the cold sheet stamping of a complex-profile part "frame crossbar" of a heavy-duty vehicle in the form of an edge crack

Другая группа методов реализует улучшение процесса штамповки за счет применения методов моделирования деформации при холодной деформации металла. Например, в [12, 13] рассмотрен опыт листовой штамповки лонжерона большегрузного автомобиля. Возникающие дефекты в местах скруглений и перегибов детали устраняются конструктивными улучшениями штамповочной оснастки, улучшающей равномерность вытяжки металла в процессе холодной пластической деформации за счет моделирования конечными элементами процесса деформирования металла. В [14] рассмотрено моделирование и улучшение конечно-элементной сетки для нахождения условий деформации длиномерной листовой заготовки, в [15] детали уголок.

Следует отметить, что моделирование в программных продуктах не учитывает фактического изменений свойств конкретного листопрката для обеспечения годности отштампованных полуфабрикатов, а также снижение пластичности материала при наличии концентраторов на кромках от вырубки, что не позволяет в полной мере обеспечить прогнозирование возникновения дефек-

ВЫБОР ЛИСТОПРОКАТА ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ, УМЕНЬШАЮЩИЙ ВЕРОЯТНОСТЬ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ТРЕЩИН ПРИ ХОЛОДНОЙ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКЕ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ

тов штамповки деталей из высокопрочной стали.

Таким образом, разработка результативного производственного метода, обеспечивающего оценку штампуемости листопрката из высокопрочных сталей с учетом фактического изменения механических свойств партий металла и чистоты кромки заготовок после вырубки, является актуальной задачей.

ИССЛЕДОВАНИЯ

Авторами разработан способ оценки штампуемости листопрката по данным испытаний образца трещиностойкости [16]. На боковой стороне образца выполняется V-образный концентратор напряжений, имитирующий естественные концентраторы, наличие которых на кромках штампуемой детали в местах высоких значений напряжений, приводит к возникновению трещин (рис. 2, б). Параметры надреза обоснованы по данным профилографического исследования кромок после их вырубки.

Надрез выполняется на фрезерном станке угловой фрезой с углом при вершине 55°, радиусом 0,5 мм и глубиной в 1,2 мм. Испытание выполняется трхточечным изгибом (рис. 2, а). Диаметр гибочного пуансона – 6 мм. При этом диаметре пуансона образец показал высокую чувствительность к образованию трещин, позволяющую оценивать склонность поступающего в

производство листопрката к возникновению трещин и на основе этих данных прогнозировать его штампуемость. Увеличение диаметра пуансона резко снижает чувствительность образца к появлению трещин в зоне искусственного концентратора. Отметим, что образцы без искусственного концентратора при изгибе до 180° не образуют на изгибе видимых трещин.

В процессе выполнения испытаний в конструкции испытательной машины предусмотрена регистрация перемещение пуансона [17]. После испытаний, по значениям перемещений которого рассчитывались значения следующих углов образования трещин:

α_{TM} – начала зарождения микротрещин;

$\alpha_{нач.}$ – начальный угол возникновения заметной трещины (длина 1 мм.);

$\alpha_{макс.}$ – развития трещины (длина 3 мм.).

По измеренным данным дополнительно рассчитывается средний угол изгиба образца возникновения заметных трещин рассчитывается, по следующей формуле:

$$\alpha_{ср.} = \frac{\alpha_{нач.} + \alpha_{макс.}}{2}$$

На рис. 2, в приведен внешний вид образцов после проверки трещиностойкости со следами возникновения трещин в месте нанесения искусственного концентратора напряжений.

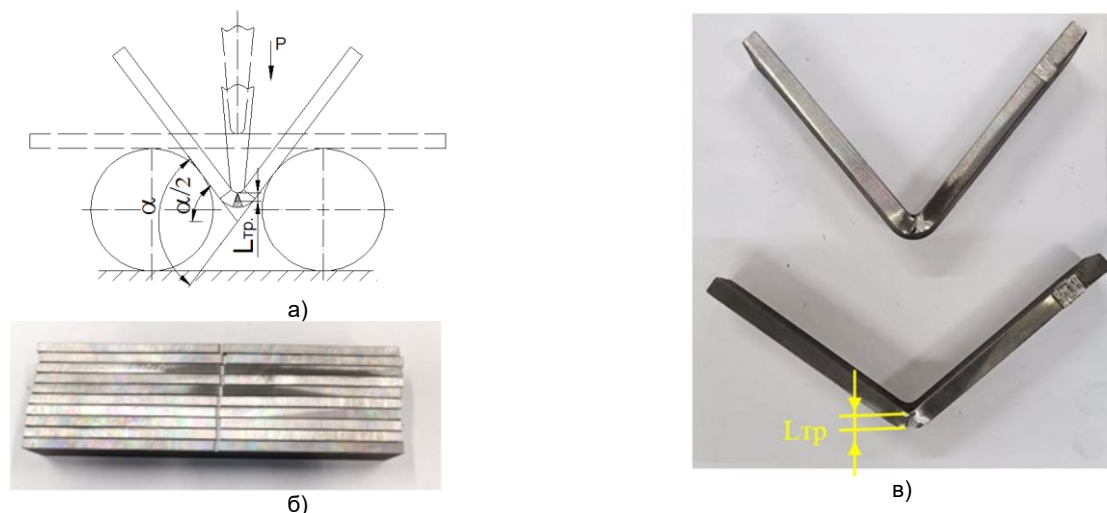


Рисунок 2 – Испытания на трещиностойкость: а) схема испытаний, б) изготовленные образцы, в) образцы после испытаний

Figure 2 – Crack resistance tests: a) test scheme, b) manufactured samples, c) samples after testing

Таблица 1 – Углы возникновения трещин на образцах при испытании на трещиностойкость листопрката толщиной 6 мм стали S 550MC

Table 1 – The angles of occurrence of cracks on the samples during the crack resistance test of sheet metal with a thickness of 6 mm steel S 550MS

Показатели	Партия базовая*	№ партии								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\delta\%$		28,25	27,75	28,25	28,25	31,5	29,25	30	29	29,25
$\delta_s\%$		15	16,8	17	18	18,5	17,8	19	15	18,2
K _{ска}		1,17	0,6	1,10	1,55	1,20	1,60	1,30	0,90	1,65
α_{TM}		90	94	94	96	94	92	94	94	94
$\alpha_{нач.}$		125	107	94	94	101	96	94	94	94
$\alpha_{макс.}$		125	107	116	125	125	128	120	112	127
$\alpha_{ср.}$		125	107	105	109,5	113	112	107	103	110,5
$\alpha_{макс.ПР}$	105									
$\alpha_{TM.ПР}$	76									

* - партия листопрката, приводящая к краевым трещинам

Величина начала развития трещины и динамика ее развития зависит от свойств листопрката и гео-

метрических параметров искусственного концентратора напряжений. Экспериментальные данные испы-

таний подтверждают достаточную для практического применения чувствительность разработанного образца к возникновению трещин на изгибе.

Авторами разработана методика анализа трещиностойкости листопроката на трёхточечный изгиб, в условиях заводской лаборатории. Испытания образцов выполнялись на испытательной машине Zwick/Roell Z100 и в цеховых условиях на специализированной испытательной машине мод. В-5. Из каждой исследуемой партии, используемой в производстве, изготавливается по 4 образца испытаний на трещиностойкость. Такое количество образцов необходимо для повышения надёжности определения величин образования трещин. В процессе испытаний одновременно регистрируется величина перемещения пуансона с визуальным контролем процесса трещинообразования в месте искусственного концентратора напряжений.

Обобщенные данные испытаний образцов с искусственными концентраторами напряжений на трещиностойкость приведены в таблице 1.

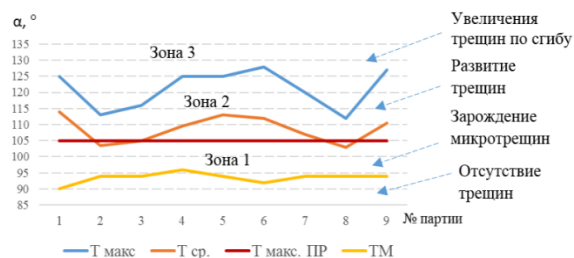


Рисунок 3 – График изменения углов трещиностойкости образцов листопроката партий запуска

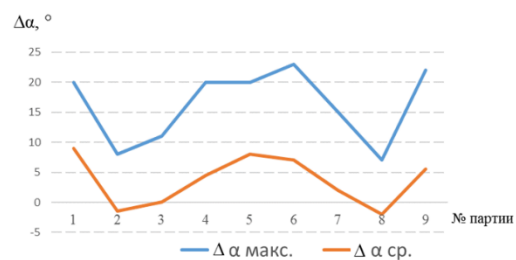
Figure 3 – Graph of changes in the angles of crack resistance of sheet metal samples of launch batches

На рисунке 3 приведены графики изменения углов возникновения трещин образцов. Для всех партий листопроката угол зарождения микротрещин на сгибе образца практически одинаковы и изменяются в диапазоне от 90 ° до 94 °. Угол образования трещин образцов изменяется в больших пределах – от 108 ° до 130 °, что свидетельствует об изменении пластических свойств разных партий листопроката. В результате на графической зависимости можно выделить различные области трещинообразования – отсутствия трещин, зарождения микротрещин, развития микротрещин и образования трещин по всему сгибу.

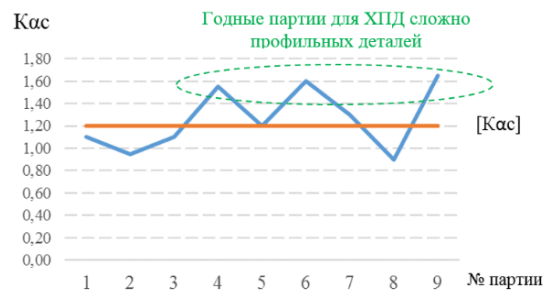
РЕЗУЛЬТАТЫ

Эти сведения по трещиностойкости партий металлопроката являются исходными для принятия решения об использовании той или иной партии листопроката для штамповки деталей, склонных к образованию трещин. Выполненные испытания листопроката, приводящего к возникновению трещин поперечины рамы, показали следующие результаты: минимальный угол зарождения микротрещин 95 °, развития возникновения трещин в листопрокате – 108 °.

На рисунке 4 приведен график углов возникновения заметных (средних) и значимых углов возникновения трещин образцов. Запуск различных партий листопроката на изготовление поперечины рамы может приводить к различным рискам возникновения трещин. На графике можно выделить следующие зоны появления трещин листопроката, в данном случае применительно к поперечине рамы: 1 – высокой вероятности; 2 – умеренной вероятности; 3 – низкой вероятности.



а)



б)

Рисунок 4 – Графики а) изменения интервалов развития трещины $\Delta\alpha_{\text{ср.}}$, $\Delta\alpha_{\text{макс.}}$ б) критерия оценки запаса пластичности $K_{\text{ас}}$ по данным испытаний образцов на трещиностойкость

Figure 4 – Graphs a) changes in the intervals of crack development $\Delta\alpha_{\text{md.}}$, $\Delta\alpha_{\text{max.}}$ b) criteria for assessing the reserve of plasticity K_{ac} according to the data of tests of samples for crack resistance

Косвенная оценка пластичности листопроката партий листопроката по данным испытаний образцов с искусственным концентратором выполняется по следующему критерию:

$$K_{\text{ас}} = \frac{\Delta\alpha_{\text{макс.}} - \Delta\alpha_{\text{ср.}}}{H_{\alpha}}$$

где H_{α} – запас трещиностойкости, (принято значение в 10 °).

$\Delta\alpha_{\text{макс.}}$ – интервал развития трещины по максимальному углу раскрытия, °

$$\Delta\alpha_{\text{макс.}} = \alpha_{\text{макс.}i} - \alpha_{\text{макс. ПР}}$$

где $\alpha_{\text{макс.}i}$ – максимальный угол изгиба образца трещиностойкости образцов листопроката, рассматриваемой партии листопроката,

$\alpha_{\text{макс. ПР}}$ – максимальный угол изгиба среди образцов трещиностойкости, изготовленных из партии листопроката, приводящей к трещинам листовой штамповки, °

$\Delta\alpha_{\text{ср.}}$ – интервал развития трещины по среднему углу образования трещин, рассматриваемой партии листопроката, °

$$\Delta\alpha_{\text{ср.}} = \alpha_{\text{ср.}i} - \alpha_{\text{макс. ПР}}$$

где $\alpha_{\text{ср.}i}$ – средний угол возникновения трещин образцов, °

$\alpha_{\text{ср.ПР}}$ – средний угол образования трещин образцов из партии, приводящей к трещинам листовой штамповки, °

По данным испытаний листопроката, найдены диапазоны изменений показателей $\Delta\alpha_{\text{макс.}}$ 10 – 15 ° и $\Delta\alpha_{\text{ср.}} \pm 5$ °.

ОБСУЖДЕНИЕ

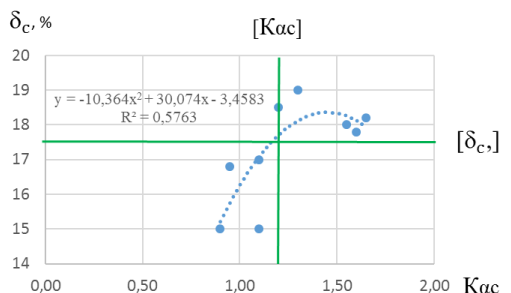
Для изготовления поперечины не следует за-
ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2026

ВЫБОР ЛИСТОПРОКАТА ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ, УМЕНЬШАЮЩИЙ ВЕРОЯТНОСТЬ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ТРЕЩИН ПРИ ХОЛОДНОЙ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКЕ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ

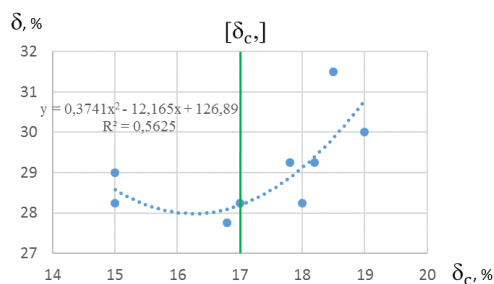
пускать партию № 2, у которой средняя и максимальная величина угла изгиба образцов близка к минимальному углу раскрытия образца, приводящего к возникновению трещин поперечины рамы. По трещиностойкости партия № 2 близка к партии, приводящей к трещинам при штамповке поперечины рамы. Применение партий № 4, № 6 и № 9 приводят к устранению трещин холодной листовой штамповки детали поперечина рамы, поскольку значения критерия K_{ac} значительно больше заданного значения в 1,2.

Для установления влияния критерия трещиностойкости дополнительно выполнены испытания образцов с искусственными концентраторами напряжений и без них на одноосное растяжение, в результате которого установлены значения относительного удлинения образцов на базовой длине l_0 в 60 мм на рис. 5. Увеличение значения критерия сопровождается увеличением относительного удлинения образцов с искусственным концентратором напряжений до 19 %, образцов без концентратора напряжений – до 30 %.

При выборе листопроката для холодной пластической деформации сложнопровильных деталей, исключающей возникновение краевых трещин, необходимо обеспечить значение критерия выбора листопроката K_c по данным испытаний разработанных образцов с искусственным концентратором на трещиностойкость, удовлетворяющее следующему условию $K_{ac} > 1,2$.



а)



б)

Рисунок 5 – Графики а) относительного удлинения образца с искусственным концентратором напряжений δ_c и K_{ac} , б) относительного удлинения образцов с концентратором напряжений δ_c и без концентратора δ .

Figure 5 – Graphs of a) relative elongation of a sample with an artificial stress concentrator δ_c and K_{ac} , b) relative elongation of samples with a stress concentrator δ_c and without a stress concentrator δ .

В производственных условиях может оказаться, что все партии не соответствуют критерию выбора листопроката, тогда запускать в производство необходимо листопрокат с $K_{ac} > 1$, но при этом обеспечить за счет наладки вырубного штампа минимальную шероховатость боковой поверхности вырубленной заготовки, либо вме-

сто вырубку выполнять раскрой заготовки лазером.

На рис. 6 приведена схема процессов, обеспечивающих внедрение программы испытаний трещиностойкости листового проката для предотвращения дефектности штамповки. Испытания на трещиностойкость металла выполняются для проблемных деталей, склонных к возникновению трещин в процессе их изготовления. Найденные в процессе испытаний минимальные и средние углы образования трещин уточняют предельные значения критерия пригодности поступающего в производство листопроката для штамповки конкретных проблемных деталей.



Рисунок 6 – Схема процессов внедрения метода оценки трещиностойкости листового проката для предотвращения дефектности штамповки

Figure 6 – The scheme of processes for the implementation of the method for assessing the crack resistance of rolled products to prevent defective stamping

Преимуществом применения трехточечного изгиба при испытаниях образцов является возможность выполнения испытаний не только на специализированных испытательных машинах, но с использованием гидравлического пресса с дополнительной оснасткой трехточечного нагружения образца, что важно для оперативного выполнения работ по оценке пригодности листопроката к холодной листовой штамповке в цеховых условиях.

ВЫВОДЫ

1. Предложена и обоснована программа испытаний листопроката на трещиностойкость в виде испытаний трехточечным изгибом разработанных образцов с искусственным концентратором напряжений на испытательной машине и регистрации в процессе испытаний углов начала зарождения микротрещин, возникновения заметной трещины и развития трещины.

2. Предложен критерий трещиностойкости K_{ac} листопроката, расчетные значения которого определяются по данным испытаний образцов с искусственно нанесенным концентратором. Образцы изготавливаются из сравнимого листопроката и приводящего к краевым трещинам штамповки. Найденные в результате цеховых испытаний листопроката толщиной 6 мм из стали S550MC значения критерия $K_{ac} > 1,2$ позволяют в процессе входного контроля выбрать листопрокат, обеспечивающий бездефектную холодную пластическую деформацию металла деталей сложной формы.

3. Благодаря использованию образца с искусственным концентратором, выполненным на боковой поверхности, обеспечена их чувствительность к образованию трещин. Исследованный листопрокат толщиной 6 мм

стали S550MC имеет значительный размах показателей трещиностойкости: по углу начала зарождения трещин от 70 ° до 96 °, развития трещины от 107 ° до 128 °.

4. Разработана схема включения разработанной программы испытаний листопрката на трещиностойкость в процесс его приемки и запуска в производство для снижения дефектности холодной листовой штамповки несущих деталей рамы большегрузных автомобилей в крупносерийном производстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зоренко Д.А. САЕ-моделирование работы пуансона при формовании изделий из листовой стали // Механика и машиностроение. Наука и практика: Материалы международной научно-практической конференции № 1, Санкт-Петербург, 2018. С. 52–55.
2. Морозов О.И. Моделирование и анализ НДС разделительных операций листовой штамповки / О.И. Морозов // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2021. № 3(95). С. 21–26.
3. Аверкиев А.Ю. Методы оценки штампуемости листового металла. М.: Машиностроение, 1985. 176 с.
4. Аверкиев А.Ю. Оценка штампуемости листового и трубного проката // Кузнечно-штамповочное производство. 1990. № 2. С. 19–24.
5. Бурдуковский В.Г. Технология листовой штамповки: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. 2019. 224 с.
6. Матюк В.Ф. Состояние неразрушающего контроля штампуемости листового проката сталей // Неразрушающий контроль и диагностика. 2012. № 3. С. 15–42.
7. Правила выбора режимов термообработки стальных заготовок для холодной объемной штамповки / Д.Л. Панкратов, Р.В. Гавариев, С.Г. Владимиров // Наука и современность. 2017. № 1 (11). С. 157–169.
8. Пачурин Г.В. Ресурсосберегающая подготовка структуры и механических свойств стали 40Х для холодной объемной штамповки метизов / Пачурин Г.В., Филиппов А.А., Чиненков С.В. // Известия МГТУ МАМИ. 2013. Т. 2, № 2(16). С. 19–23.
9. Выбор оптимальных параметров вытяжки листовых заготовок / Борисевич В.К., Загирняк М.В., Драгобецкий В.В. // КШП ОМД. 2009. № 2. С. 38–41.
10. Способ определения технологичности листов тупоплавленных металлов под штамповку. пат. 2231770 С2 Рос. Федерация, № 2002122972/28: заявл. 26.08.2002: опубл. 27.06.2004.
11. Способ определения пригодности стали для холодной пластической деформации: пат. № 2568887 С1 Рос. Федерация, № 2014148855/15: заявл. 03.12.2014: опубл. 20.11.2015
12. Кашапова Л.Р. Автоматизированная оценка надежности технологического процесса листовой штамповки / Л.Р. Кашапова, Д.Л. Панкратов, В.Г. Шibaков // Вестник машиностроения. 2016. № 4. С. 56–59.
13. Обеспечение качества деталей сложной формы на этапе проектирования технологического процесса листовой штамповки / Л.Р. Кашапова, Д.Л. Панкратов, В.Г. Шibaков, А. И. Виноградов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2016. № 1. С. 81–86.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.

The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

14. Крючков Д.И. Компьютерное моделирование штамповки длинномерной листовой заготовки элемента шарового резервуара / Д.И. Крючков, И.М. Березин, А.А. Петунин // Вестник машиностроения. 2019. № 2. С. 28–31.

15. Моделирование напряженно-деформированного состояния штампового инструмента с износостойким покрытием на разделительных операциях листовой штамповки с использованием программного пакета LS-DYNA / Морозов О.И., Табаков В.П., Кокорин В.Н. [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материалы. 2020. Т. 22, № 3. С. 5–11.

16. 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 ПНИПУ Машиностроение. Материаловедение. 2024. № 3. С. 74–81.

17. ГОСТ Р ИСО 7438-2013 Материалы металлические. Испытание на изгиб / Москва: Стандартинформ 2014. С. 9.

Информация об авторах

Д. Т. Сафаров – кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» Набережночелнинского института (филиала) Казанского (Приволжского) федерального университета.

В. И. Астащенко – доктор технических наук, профессор кафедры «Материалов, технологий и качества» Набережночелнинского института (филиала) Казанского (Приволжского) федерального университета.

Т. В. Соченко – аспирант кафедры «Материалов, технологий и качества» Набережночелнинского института (филиала) Казанского (Приволжского) федерального университета.

Information about the authors

D.T. Safarov - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Design and Technological Support of Machine-building Industries, Naberezhnye Chelny Institute (branch) Kazan (Volga Region) Federal University.

V.I. Astashchenko - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Materials, Technologies and Quality of Naberezhnye Chelny Institute (branch) Kazan (Volga Region) Federal University named after.

T.V. Sochenko - Postgraduate student of the Department of Materials, Technologies and Quality of the Naberezhninsky Institute (branch) Kazan (Volga Region) Federal University.