



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки).
УДК 620.174

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.01.041

EDN: ZJWEUB

МЕТОДИКА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ ЛИСТОПРОКАТА ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ СТАЛЕЙ НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ

Сафаров Дамир Тамасович¹, Астащенко Владимир Иванович²,
Мухаметзянова Гульнара Фагимовна³, Соченко Татьяна Владимировна⁴

^{1, 2, 3, 4} 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 gulnara-ineka@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3046-5859>

⁴ stv09@mail.ru

Аннотация. Проведен анализ факторов, оказывающих значительное влияние на возникновение дефектов при холодной листовой штамповке ответственных несущих деталей большегрузного автомобиля из стали S550MC. Изменений пределов прочности σ_b от 615 до 700 МПа, предела текучести σ_t от 530 до 640 МПа. Наличие концентраторов на боковой поверхности листа приводит к уменьшению относительного удлинения δ с 28 % до 15–17 %. Анизотропия свойств по листам приводит к изменчивости относительного удлинения до 15 %, предела текучести – до 15 %. Выполнены проектные процедуры разработки требований к образцам для испытания листопроката на трещиностойкость с учетом особенностей листовой штамповки, позволяющие значительно повысить чувствительность образца к образованию трещины. По данным профилографического исследования, кромки в зоне долома установлены диапазоны изменений углов впадин α от 20 ° до 70 °, глубина h концентратора – от 6 до 12 мкм и радиуса R при вершине от 2 до 20 мкм. Разработана проба оценки трещиностойкости с V-образным концентратором напряжений с $R = 0,5$ мм, $\alpha = 55^\circ$, $h = 0,8–1,2$ мм, повторяющих форму естественным под технологию лезвийной обработки в цеховых условиях. Рассмотрена методика испытаний трехточечным изгибом, показавшая высокую чувствительность образца к возникновению микротрещин на углах изгиба от 70 ° до 95 ° на листопрокате, не дающем возникновения трещин при изгибе без концентратора вплоть до 170 °. Приведены сравнительные результаты испытаний образцов листопроката, склонного к возникновению дефектов холодной листовой штамповки ответственных деталей сложной формы в крупносерийном производстве, угол начала возникновения микротрещин составил 75 °. Развитие трещины до длины 3–5 мм происходит на угле до 105 °. У образцов из листопроката, не приводящих к трещинам штамповки, угол возникновения микротрещин 95 ° с развитием трещины до длины 3–5 мм на угле 125 °, что обеспечивает возможность выполнения входного листопроката для оценки его склонности к возникновению трещин холодной листовой штамповки.

Ключевые слова: листопрокат, высокопрочная сталь, трещиностойкость, образец, концентратор напряжений, профилограмма, шероховатость.

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: Методика производственных испытаний листопроката из высокопрочных мелкозернистых сталей на трещиностойкость / Сафаров Д. Т. [и др.] // Ползуновский вестник. 2026. № 1. С. 257–264. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.01.041. EDN: <https://elibrary.ru/ZJWEUB>.

Original article

METHOD OF PRODUCTION TESTING OF SHEET METAL FROM HIGH-STRENGTH FINE-GRAINED STEELS FOR CRACK RESISTANCE

Damir T. Safarov¹, Vladimir I. Astashchenko², Gulnara F. Mukhametzhanova³,
Tatiana V. Sochenko⁴

^{1, 2, 3, 4} Naberezhnye Chelny Institute (branch) Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia

© Сафаров Д. Т., Астащенко В. И., Мухаметзянова Г. Ф., Соченко Т. В. 2026

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 gulnara-ineka@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3046-5859>

⁴ stv09@mail.ru

Abstract. The analysis of factors that have a significant impact on the occurrence of defects during cold stamping of critical load-bearing parts of heavy-duty vehicles made of S550MS steel has been carried out. Changes in tensile strength σ_b from 615 to 700 MPa, yield strength σ_t from 530 to 640 MPa. The presence of concentrators on the lateral surface of the sheet leads to a decrease in the elongation δ from 28% to 15-17%. The anisotropy of properties across the sheets leads to a variation in elongation of up to 15%, yield strength of up to 15%. Design procedures for developing requirements for samples for testing sheet metal for crack resistance have been completed, taking into account the features of sheet stamping and allowing for a significant increase in the sensitivity of the sample to crack formation. According to the data of the profilographic study of the edge in the dolom zone, ranges of changes in the angles of the depressions α from 20° to 70°, the depth h of the concentrator from 6 to 12 microns and the radius R at the top from 2 to 20 microns have been established. A crack resistance assessment test with a V-shaped stress concentrator with $R=0.5$ mm, $\alpha=55^\circ$, $h=0.8-1.2$ mm, repeating the shape of the blade according to the technology of blade processing in workshop conditions, has been developed. A three-point bending test procedure is considered, which showed a high sensitivity of the sample to the occurrence of microcracks at bending angles from 70° to 95° on a sheet roll that does not cause cracks when bending without a concentrator up to 170°. Comparative test results of sheet metal samples, which are prone to defects in cold forming of complex-shaped critical parts in large-scale production, are presented, the angle of onset of microcracks was 75°. The crack develops to a length of 3-5 mm at an angle of up to 105°. In sheet metal samples that do not lead to stamping cracks, the angle of occurrence of microcracks is 95° with the development of a crack to a length of 3-5 mm at an angle of 125°, which makes it possible to perform an input sheet roll to assess its tendency to cracks in cold sheet stamping.

Keywords: rolled sheet, high-strength steel, crack resistance, sample, stress concentrator, profilogram, roughness.

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., Mukhametzyanova, G. F. & Sochenko, T. V. (2026). Method of production testing of sheet metal from high-strength fine-grained steels for crack resistance. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 257-264. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.01.041. EDN: <https://elibrary.ru/ZJWEUB>.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время применение в автомобилестроении мелкозернистых высокопрочных сталей позволяет снизить металлоемкость ответственных деталей автомобилей до 30 %. Между тем сочетание высокой прочности и невысокой пластичности металла в процессах холодной листовой штамповки деталей сложной конфигурации из различных партий листопроката может приводить к возникновению дефектов продукции в виде трещин в краевой зоне (рис. 1). Листовая штамповка поперечин рамы выполняется на кривошипном прессе в два перехода. Гибка буртов силовых хомутов выполняется в один переход на гидравлическом прессе. Для улучшения качества листовой штамповки деталей различной конфигурации известны различные исследования, которые направлены на снижение дефектности. Распространены исследования, в которых разрабатываются индивидуальные конструкторские усовершенствования. Например, в [1, 2, 3] устранение утяжин в местах изгиба, трещины и складки, а также отклонения размеров выполнено за счет совершенствования конструкции штампов. Известны исследования, направленные на улучшение качества листовой штамповки за счет моделирования условий деформирования металла в процессах листовой штамповки [4, 5, 6].

В [7] для определения закономерностей для моделирования процессов холодной листовой штамповки предлагается выполнять на основе испытаний материала на сдвиг. Имеется ряд работ, направленных на экспериментальное исследование деформаций заготовок путем нанесения на их поверхность разметки и измерения деформаций в интересующих точках детали [8, 9]. Несмотря на достаточно развитые исследования процессов листовой штамповки в литературе практически не рассмотрены вопросы предотвращения дефектности холодной листовой

штамповки из высокопрочной стали в условиях крупносерийного производства.

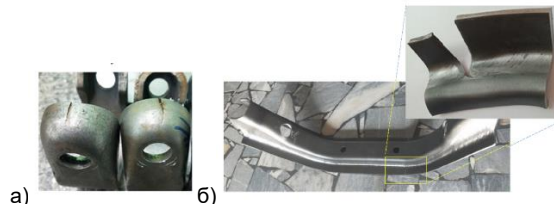


Рисунок 1 – Дефекты листовой штамповки несущих ответственных деталей автомобиля: а) силовых хомутов; б) поперечин рамы

Figure 1 – Defects in the sheet stamping of the bearing critical parts of the car: a) power clamps, b) frame crossbars

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Входной контроль листопроката в общем виде включает испытания на соответствие требованиям стандарта [10], а именно:

- контроль химического состава металла листопроката;
- металлографический анализ на степень загрязненности стали неметаллическими включениями, размеру зерна, полосчатости, макро- и микростроению;
- испытания на растяжение для подтверждения механических свойств;
- испытания на трехточечный изгиб для определения наличия трещин при изгибе образца на 180° в соответствии с требованиями стандарта [11].

Каждую поставку листопроката сопровождает сертификат лаборатории производителя, содержащий данные о его химическом составе и механических свойствах. Как правило, работники служб ОТК проверяют его содержание и, доверяя сертификату поставки, запускают его в производство. Это снижает

МЕТОДИКА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ ЛИСТОПРОКАТА ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ СТАЛЕЙ НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ

затраты лаборатории на текущий контроль. Для проверки данных сертификата осуществляется выборочная проверка проката. Рассмотрим результаты проверки данных сертификата качества поставки листопрката двух плавок листопрката сталей S355MC и S550MC, из которых изготовлены детали, приведенные на рисунке 1.

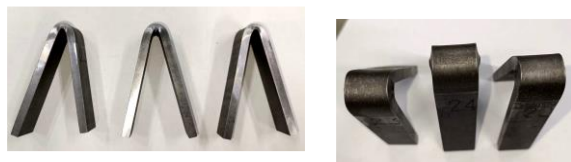


Рисунок 2 – Образцы после испытаний на трехточечный изгиб

Figure 2 – Samples after three-point bending tests

Для определения массовой доли химических элементов применялся оптико-эмиссионный анализатор CXR-950. Данные по содержанию химических элементов

Таблица 1 – Химический состав плавок листопрката высокопрочных мелкозернистых сталей

Table 1 – The chemical composition of sheet metal melts. high-strength fine-grained steels.

Марка стали	Содержание элементов, масс. Доля %										
	C %	Mn %	Si %	Cr/Ni %	P %	S %	Al %	Nb %	V %	Ti %	Nb+Ti+V%
S355MC	0,06 (≤0,12)	0,63 (≤1,50)	0,03 (≤0,50)	0,037/0,029 (≤0,03)	0,012 (≤0,025)	0,02 (≤0,020)	0,053 (≤0,015)	0,05 (≤0,09)	0,004 (≤0,20)	0,001 (≤0,15)	0,055 (≤0,22)
S550MC	0,105 (≤0,12)	1,46 (≤1,50)	0,03 (≤0,50)	0,014/0,011 (≤0,03)	0,007 (≤0,025)	0,002 (≤0,020)	0,053 (≤0,015)	0,035 (≤0,09)	0,004 (≤0,20)	0,03 (≤0,15)	0,085 (≤0,22)

Таблица 2 – Механические свойства листопркатанных высокопрочных мелкозернистых сталей.

Table 2 – Mechanical properties of sheet-rolled high-strength fine-grained steels

	σ _B , МПа	σ _T , МПа	ε, %	Изгиб (на 189°)	Твердость (НВ)
S355MC	502 (430-550)	453 (≥355)	35 (≥23)	Отсутствует (отсутствие трещин)	161 (≤180)
S550MC	666 (430-550)	584 (≥355)	28 (≥23)	Отсутствует (отсутствие трещин)	187 (≤210)

Примечание – в скобках приведены требования по НТД

В результате выполнения металлографического исследования определены следующие структурные показатели металла: феррит, структурно-свободный цементит, имеющий склонность к залеганию в виде сетки, охватывающий не более 1/6 периметра зерен феррита (2А балла) (рис. 3), размер зерна – 9–11 балл (ГОСТ 5639-65), загрязненность по окислам – 1 балл, сульфидам – 1 балл и силикатам – 0,5 балл по ГОСТ 1778-70. Поверхностные дефекты по ГОСТ 21014-2022 – в пределах допуска по EN 10149-2 и ТУ 14-101-809-2010, микротвердость феррита составляет от 165 до 197HV₁₅ и феррито-перлитной смеси (в полосе) – от 200 до 262HV₁₅.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Несмотря на соответствие всех показателей качества металлопрката все же в процессе листовой штамповки отдельных партий металла в местах перегиба возникают трещины. Причиной возникновения трещин является значительная дисперсия показателей в пределах требований стандарта и – особенно – по пластическим свойствам листопрката.

Так, например, предел прочности в партиях листопрката σ_B изменяется в пределах от 615 до 700 МПа, предел текучести σ_T от 525 до 556 МПа (рис. 4). В отдельных партиях отношение σ_T/σ_B может принимать неблагоприятные для штамповки значения 0,8–0,9. Как показали исследования, подготовка кро-

приведены в таблице 1. Установлено, что химический состав листопрката соответствует требованиям стандарта.

Определение механических свойств стали выполнялось на испытательной машине Zwick/Roell Z-100. При растяжении стандартных образцов на этой же машине выполнялись испытания и на изгиб. Результаты исследования механических свойств приведены в таблице 2. Обратим внимание, что на изгибе, согнутых на 160 ° стандартных образцов, появление трещин не обнаружено (рис. 2). Диаметр пуансона испытательной машины, согласно нормативным требованиям, составил величину в 7 мм. Видно, что в состоянии поставки листопркат по механическим свойствам и твердости соответствует требованиям нормативно-технической документации.

Профилографические исследования выполнялись с применением профилографа Mahr M400, цеховые испытания на изгиб выполнялись на испытательной машине В 5.

мок листовых заготовок влияет на изменение относительного удлинения образцов.

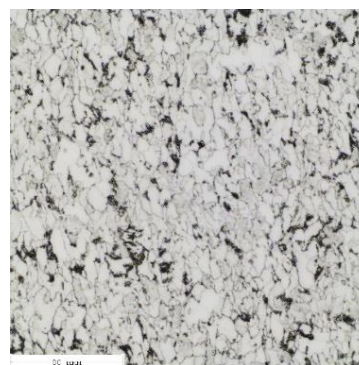


Рисунок 3 – Микроструктура листопрката металла S355 MC (увеличение 500x)

Figure 3 – Microstructure of sheet metal S355 MS (magnification 500x)

На рисунке 5 приведена диаграмма растяжения стандартных образцов, полученных лазерной резкой и путем вырубки на прессе. Снижение шероховатости одновременно с оплавлением кромок образца после лазерной резки приводит к увеличению относительного удлинения стандартных образцов δ на 35–50 %.

Увеличение шероховатости при износе вырубного штампа может приводить к уменьшению относительного удлинения образцов до 35 %. В пределах одного листа партии листопрката относительное удлинение может изменяться на величину до 15% (рис. 6).

Следует отметить, что предприятие-изготовитель деталей не может управлять этими показателями свойств и вынуждено работать с поставленным листопркатом во всем диапазоне их изменения. Таким образом, возникает необходимость в разработке оперативного метода оценки пригодности листопрката для конкретных условий выполнения различных разделочных операций при изготовлении деталей в крупно-серийном производстве.

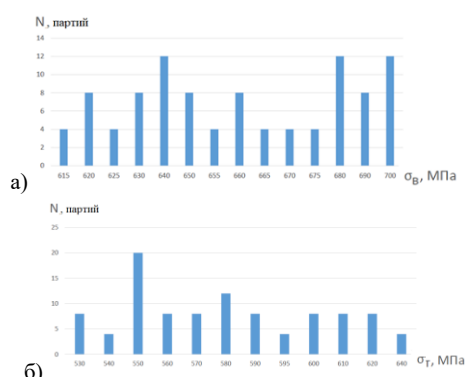


Рисунок 4 – Гистограммы изменения предела прочности σ_b и предела текучести σ_T в партиях запуска листопрката из стали S550 MC

Figure 4 – Histograms of changes in tensile strength σ_b and yield strength σ_t in batches of steel S550 MS sheet metal rolling

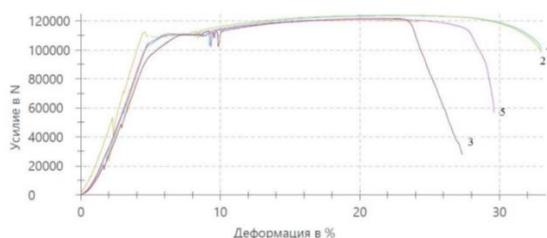


Рисунок 5 – Диаграммы растяжения образцов из сталей S550 MC: 2 и 4 – вырезанных лазером; 3 и 5 – полученные на прессе вырубкой.

Figure 5 – Stretching diagrams of S550 MS steel samples: 2 and 4 – laser-cut; 3 and 5 – obtained by cutting in a press

Широко распространены методы испытаний листопрката на трещиностойкость, которые излагаются как в отечественных, так и зарубежных стандартах, устанавливающих требования к образцам и методикам проведения испытаний [12–15]. Согласно требованиям отечественного стандарта [12], испытания на трещиностойкость выполняется на специально изготовленных образцах при различных видах нагрузки – растяжении и изгибе. Форма концентраторов и их расположение на образцах имитируют различные варианты развития усталостной трещины – при растяжении, растяжении и изгибе, сдвиге и изгибе.

Из перечисленных методов испытаний наиболее простым для реализации в производственных условиях, а также близким к нагрузке в опасных местах возникновения трещин при листовой штамповке выбрано нагружение изгибом.

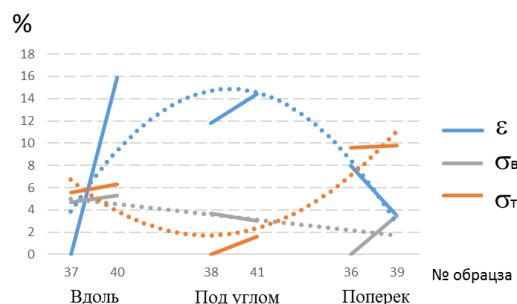


Рисунок 6 – Свойства листопрката из стали S355 MC в различных направлениях (анизотропия)

Figure 6 – Properties of S355 MS steel sheet in various directions (anisotropy)

Стандарт [12] предусматривает изготовление плоских образцов толщиной не менее 10 мм для концентраторов напряжений. Целью испытаний стандартным методом является определение предела трещиностойкости металла σ_c , который в дальнейшем необходимо проверять в опасных местах, что невозможно выполнить в действующем производстве. Рассмотрим факторы, не позволяющие внедрить требования стандарта в действующем производстве для предотвращения дефектности изделий.

Исследуемые детали изготавливаются из листопрката толщиной 6 мм, что не соответствует требованиям стандарта изготовления образцов со стандартной формой концентратора напряжений. Кроме того, имеются и дополнительные ограничения (критерии):

- сложность конструктивного исполнения концентратора напряжений требует обработки специальной фасонной фрезой или применение электроэрозионной обработки;
- варьирование параметров конструктивного исполнения концентратора, не учитывающего действительное состояние кромок заготовок детали после их вырубки на штампе или гильотине;
- высокая трудоемкость испытаний и требующая от персонала высокой квалификации (в зависимости от формы диаграммы растяжений необходимо выполнять дополнительные испытания с доломом и измерением величины усталостной трещины) с последующей дополнительной обработкой результатов.

Причем испытательные машины не поддерживают автоматизированный расчет по методикам оценки трещиностойкости. Все эти ограничения поставили задачу адаптации стандартной методики по оценке трещиностойкости листопрката для производственных условий. На первом этапе выполнены работы по исследованию профилей шероховатости поверхности для определения оптимальных параметров концентратора напряжений. Для получения профилограммы из заготовки, близкой к месту возникновения дефектов, вырезаны образцы. На рисунке 7, а приведены изломы образцов и процесс регистрации профиля шероховатости и волнистости.

Для регистрации профиля использовался профилограф ф. Mahr 400 со свободным базированием щупа, позволяющий без искажений зарегистрировать действительную форму профиля. На изломе выделено две зоны: зона среза металла под воздействием вырубного штампа, а также зона долома.

МЕТОДИКА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ ЛИСТОПРОКАТА ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ СТАЛЕЙ НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ

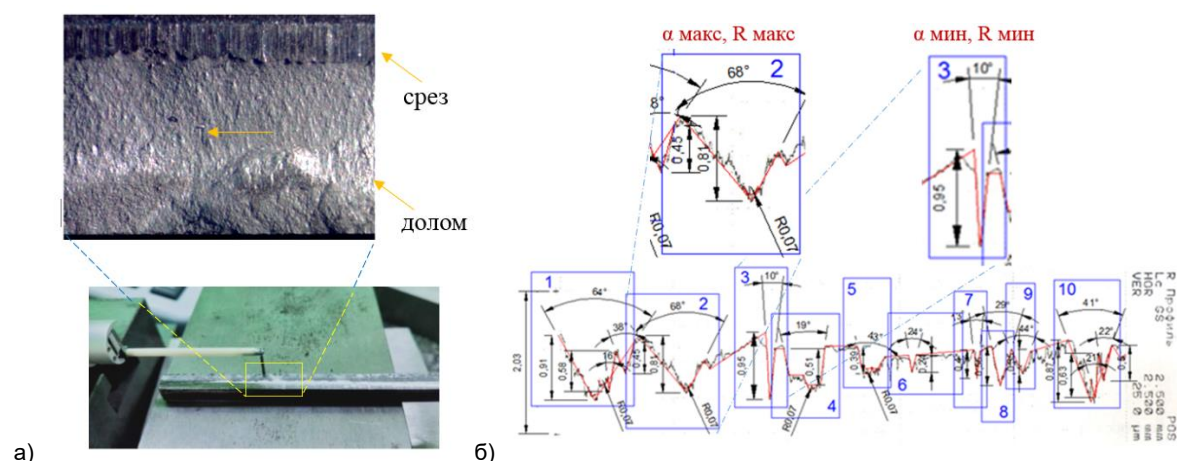


Рисунок 7 – Профилографическое исследование: а) измерение профиля шероховатости; б) профилограмма образца детали с естественными концентраторами напряжений в зоне долома

Figure 7 – Profilographic examination: a) measurement of the roughness profile, b) profilogram of the part sample with natural stress concentrators in the dolom zone

Установлено, что наибольшая шероховатость поверхности характерна для зоны долома. Эта зона содержит критические естественные концентраторы напряжений, приводящие к трещинам в процессе листовой штамповки, поэтому изменение профиля выполнено в этой зоне излома. На рис. 7, б приведена профилограмма шероховатости с выделенными на ней естественными концентраторами напряжений в виде V образных впадин с различными геометрическими параметрами. Гистограмма распределения геометрических размеров концентраторов приведена на рисунке 8. Геометрические параметры естественных концентраторов изменяются в широких пределах от 10 ° до 70 ° с значительной глубиной залегания до 0,9 мм. Эти концентраторы являются критическими для зарождения и развития трещины в процессе листовой штамповки.

На профилограмме выделены концентраторы с минимальными (элемент 10) и максимальными (элемент 2) углами, глубиной залегания и радиусом при вершине. Радиус при вершине составляет от 0,03 до 0,1 мм. По найденным критическим значениям естественного концентратора напряжений определены требования к его исполнению в пробе на трещиностойкость.

Следует отметить, что уменьшение угла профиля естественного концентратора напряжений с уменьшением радиуса при вершине и увеличением глубины залегания концентратора значительно увеличивает чувствительность пробы к возникновению трещин при трехточечном изгибе. Однако изготовление искусственного концентратора напряжений с углом при вершине концентратора менее 30 ° технологически оправданы при выполнении обработки на проволоочно-эрозионном станке. С учетом ограничений лезвийной обработки для искусственного концентратора напряжений выбран симметричный V образный профиль с минимальным углом в 30 ° и максимальным в 60 °, а также глубиной 0,8 мм. Радиус R при вершине увеличен до 0,5 мм исходя из обеспечения технологичности обработки резанием образцов на участке механической обработки предприятия. Разработанный чертеж образца для проверки на трещиностойкость листопроката приведен на рис. 10.

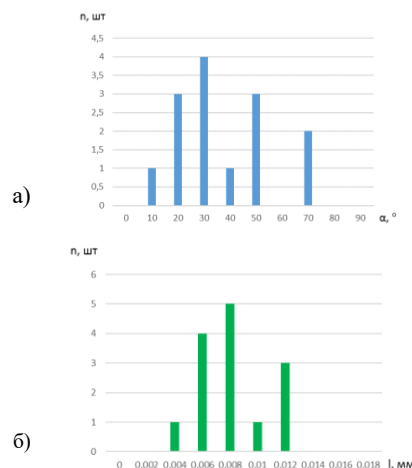


Рисунок 8 – Гистограммы распределения: а) угловых размеров, б) глубины концентраторов после вырубке заготовок из листового проката вырубным штампом

Figure 8 – Histograms of the distribution of: a) angular dimensions, b) the depth of the concentrators after cutting the blanks from the rolled metal die

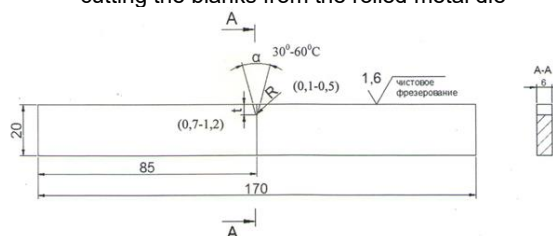


Рисунок 9 – Чертеж образца проверки трещиностойкости листового металла при условиях вырубке на прессе в местах образования трещин штамповки с учетом ограничений лезвийной обработки.

Figure 9 – Drawing of a sample for checking the crack resistance of sheet metal under cutting conditions on a press at the places where the cracks form, taking into account the limitations of blade processing

Для проведения испытаний с применением разработанных образцов они были изготовлены на универсальном оборудовании – горизонтально фрезерном станке мод. 6Т13ФЗ-1-УХЛ4 с применением угловой фрезы 1FE2200 Ø63x16x55 с углом при вершине 55°. Для обеспечения идентичных геометрических параметров концентраторов на образцах они обрабатывались пакетом (рис. 11). На рисунке 12 приведены фотографии обработанного резанием пакета образцов с искусственными концентраторами напряжений. Выполненные измерения геометрических параметров подтвердили их соответствие чертежным значениям ($R = 0,48$ мм, $\alpha = 54^\circ$, $h = 0,8$ мм).

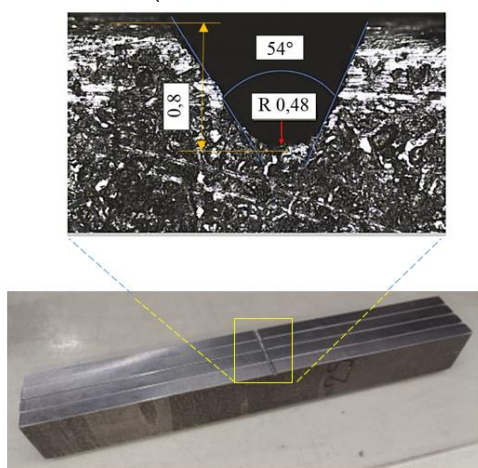


Рисунок 10 – Изготовленные образцы для испытаний на трещиностойкость партии листопроката

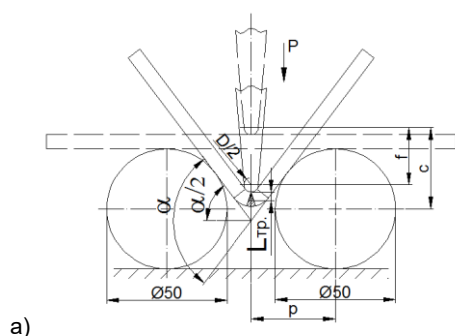
Figure 10 – Manufactured samples from, for testing for crack resistance of a batch of sheet metal

На рисунке 11 приведена схема измерений и фотографии цеховых испытаний образца трехточечным изгибом с искусственным концентратором напряжений.

Таблица 3 – Углы образования трещин в месте искусственного концентратора напряжений

Table 3 – Angles of crack formation at the site of the artificial stress concentrator

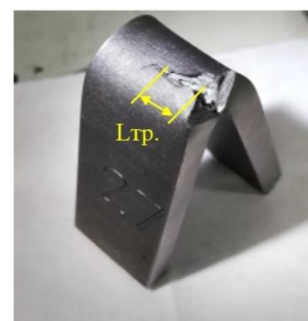
Партия листопроката, приводящая к трещинам штамповки	№	Углы	Длина трещины, мм				
			Микротрещины	1,0	2,0	3,0	4,0
Часто	1	изгиба образца	76	101	102	105	105
Редко	2		90	102	107	112	120
Не приводящая	3		95	120	122	124	125



а)



б)



в)

Рисунок 11 – Испытания образцов на проверку трещиностойкости листопроката а) схема расчета угла изгиба; б) испытание образца; в) образец с трещиной при изгибе на 130°

Figure 11 – Testing of samples to check the crack resistance of a rolled sheet: a) a scheme for calculating the bending angle, b) a sample test, c) a sample with a 130 degree bend crack

Угол изгиба образца рассчитывается в соответствии с [16] по следующей формуле:

$$\alpha = 2 * \arccos \left(\frac{Wc - c(f - c)}{p^2 + (f - c)^2} \right),$$

где f – перемещение пуансона, мм;

c – расстояние от центра отверстия до центра пуансона, мм

$$W = (p^2 + (f - c)^2 - c^2)$$

где p – расстояние от центра ролика до центра пуансона, мм

$$c = 25 + a + \frac{D}{2},$$

где a – толщина листа, мм;

D – диаметр ролика, мм

Диаметр роликов D у специального приспособления 50 мм, толщина t листопроката 6 мм, расстояние между центрами роликов 70 мм. В процессе испытаний использовались образцы, выполненные в соответствии с чертежом (рис. 11) – длина образца с искусственным концентратором 170, ширина 20 мм.

В таблице 3 приведены результаты испытаний листопроката высокопрочной стали S550MC на трещиностойкость.

ОБСУЖДЕНИЕ

Принципиальным для обеспечения чувствительности образцов к возникновению трещин является диаметр пуансона испытательной машины. Он должен быть не меньше толщины листа (не менее 6 мм). Увеличение диаметра пуансона до 7 мм и более приводит к резкому уменьшению чувствительности пробы к появлению трещин.

МЕТОДИКА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ ЛИСТОПРОКАТА ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ СТАЛЕЙ НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ

В результате на образце в месте концентратора напряжений образуется видимая трещина, длину которой регистрируют в процессе проведения испытаний разработанного образца. Образцы можно испытывать различными способами – в процессе изгиба одновременно регистрировать рост трещины и длину перемещения пуансона.

В этом случае для испытаний нужно меньшее количество образцов для проведения испытаний. Другим способом является испытание образцов на заранее известные углы, определенные из данных испытаний. Для испытаний образцов этим методом нужно большее количество изготовленных образцов.

На рисунке 12 приведены графики развития трещины в месте нанесения искусственного концентратора партий листопрката, приводящего к различной вероятности возникновения трещин холодной листовой штамповки детали поперечины рамы, относящейся к деталям сложной конфигурации. У образца, изготовленного из листопрката, приводящего к трещинам штамповки, характерно возникновение микротрещин при угле сгиба образца 70–80 ° и углу изгиба до 105 °.

У образцов, изготовленных из листопрката, приводящего к редким трещинам, характеризуется возникновением микротрещин при угле сгиба образца 80–90 ° и развитием трещины на угле изгиба до 110 °. У образцов, изготовленных из листопрката, не приводящего к трещинам, трещины и микротрещины возникают в интервале 90–96 ° и развиваются до более значимых на угле до 130–140 °. Запас по углу изгиба образца, выявляющего различие пластичности материала, составляет от 10 до 15 °, что достаточно для сортировки различных партий листопрката по склонности возникновения трещин.

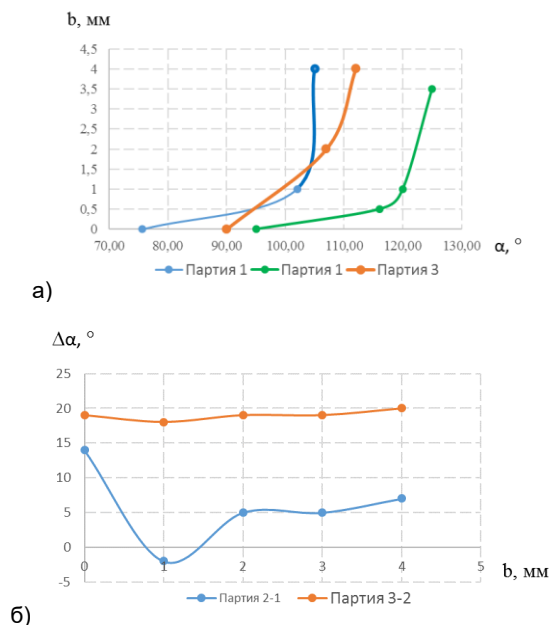


Рисунок 12 – Изготовленные образцы для испытаний на проверку трещиностойкости партии листопрката

Figure 12 – Manufactured samples for testing the crack resistance of a batch of sheet metal

Результаты испытаний установили факт достаточной чувствительности образца к возникновению трещин. Таким образом, испытания образцов позво-

ляют оценить степень пластичности листопрката для обеспечения бездефектной холодной листовой штамповки деталей из высокопрочной стали.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ / ВЫВОДЫ

1. Качество деталей, изготавливаемых из высокопрочных сталей методом холодной листовой штамповки, зависит от состояния кромок используемых заготовок. Образование разрывов металла на поверхности деталей связано с присутствием на кромках заготовок дефектов в виде выступов и глубоких впадин, унаследованных от разделительных операций листопрката.

2. Выполнены профилографические исследования кромок образцов, вырубленных на прессе, и определены параметры искусственного концентратора напряжений, имитирующего при изгибе условия штамповки нагруженной зоны. С учетом технологии обработки приемлемы следующие номинальные показатели точности $R = 0,5 \text{ мм}$, $\alpha = 55^\circ$, $h = 0,8 \text{ мм}$.

3. При испытании на изгиб стандартных образцов, изготовленных из высокопрочной мелкозернистой стали S550MC, в состоянии поставки не обнаружены склонности к трещинообразованию вплоть до ее изгиба до 180 °. Разработанный образец проверки трещиностойкости листопрката с V образным концентратором с показателями геометрической точности ($R = 0,48 \text{ мм}$, $\alpha = 54^\circ$, $h = 0,8 \text{ мм}$) по сравнению со стандартной пробой проверки листопрката на изгиб значительно более чувствительна к образованию трещин, что важно для интегральной оценки его свойств для оценки штампуемости листопрката при выполнении различных операций листовой штамповки.

4. Изготовленные и испытанные образцы проверки листопрката, вызывающего дефекты штамповки в виде трещин при диаметре пуансона, равным толщине прката в 6 мм, показали следующие результаты: средний угол образования микротрещин в 95 °, максимальный угол образования трещин величиной до 2 мм 108 °.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рихтер П.Е., Нестеренко Е.С. Повышение качества деталей П-образного вида, получаемых методом холодной листовой штамповки / Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. Вып. 5. С. 282–286.
2. Летунов А.В., Нестеренко Е.С. Повышение качества деталей типа «стаканчик», получаемых методом холодной листовой штамповки / Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. Вып. 5. С. 263–266.
3. Бровман Т.В., Шильников С.С., Горяченко А.Б. Оптимизация технологических параметров листовой штамповки / The scientific heritage 2020. № 44. С. 43–45.
4. Определение граничных условий конечного элементного моделирования процесса холодной листовой штамповки / Ф.А. Столяров, И.Г. Гун, А.Р. Вахитов [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. 2023. Т. 21. № 2. С. 90–95.
5. Численное моделирование многоэтапных процессов холодной листовой штамповки тонкостенного сосуда и их оценка с точки зрения предельных деформаций / И.Э. Келлер, А.В. Казанцев, А.А. Адамов [и др.] // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. 2021. № 2. С. 48–60.
6. Вобликов Г.А. Анализ температур при пластическом формоизменении листового металла // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 2. С. 312–314.

7. Власов А.В. Использование опытов на сдвиг для построения кривых упрочнения листовых материалов / А.В. Власов, А.А. Шитиков // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015. № 4(661). С. 79–88.

8. Адамов А.А. Экспериментальная идентификация законов пластичности и разрушения анизотропной малоуглеродистой листовой стали для моделирования холодной штамповки / А.А. Адамов, И.Э. Келлер, Д.С. Петухов // Проблемы прочности и пластичности. 2019. Т. 81. № 2. С. 202–211.

9. Инновационные механические испытания металла, подвергнутого технологическому деформированию и термической обработке : монография / Р.Е. Глинер [и др.] ; НГТУ им Р.Е. Алексеева. Нижний Новгород, 2016. 124 с.

10. EN 10149-1 Прокат плоский горячий из стали с высоким пределом текучести для формоизменения в холодном состоянии. Горячекатаный плоский прокат из высокопрочных сталей для холодной штамповки ; Часть 2: Технические условия поставки для термомеханически прокатанных сталей.

11. ГОСТ 14019-2003 Материалы металлические. Метод испытания на изгиб. М. : Изд-во стандартов, 6 с.

12. ГОСТ 25.506-85. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. М. : Государственный комитет СССР по стандартам, 1985. 61 с.

13. ASTM E 399-05. Standard test method for linear elastic plane-stain fracture toughness K_{1c} of metallic material. Annual book of ASTM standards. Volume 03.01.2005. 32 p.

14. РД 50-260-81. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик вязкости разрушения (трещиностойкости) при статическом нагружении. М. : Изд-во стандартов, 1982. 56 с.

15. Швечков Е.И. Анализ российских и зарубежных методов испытаний на статическую трещиностойкость авиационных материалов / Технология легких сплавов. 2016. № 1. С. 99–106.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 07 октября 2025; одобрена после рецензирования 24 февраля 2026; принята к публикации 16 марта 2026.

The article was received by the editorial board on 07 Oct 2025; approved after editing on 24 Feb 2026; accepted for publication on 16 Mar 2026.

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.

Г. Ф. Мухаметзянова – кандидат технических наук, доцент 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 .

G.F. Mukhametzyanova - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Materials, Technologies and Quality, Naberezhnye Chelny Institute (branch) Kazan (Volga Region) Federal University.

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