

УДК 621.7-52

## МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ НА ЭТАПЕ ЕГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Кашапова Л.Р., Панкратов Д.Л., Шibaков В.Г.

*Набережночелнинский институт КФУ, Набережные Челны, e-mail:pishite.lile@gmail.com*

С целью снижения брака в процессе листовой штамповки деталей сложной конфигурации разработана методика автоматизированной оценки надежности технологического процесса листовой штамповки на основе расчета и анализа показателей надежности. Показатели надежности технологического процесса отражают четыре основные системы листоштамповочного производства: свойства обрабатываемого материала и инструментальной оснастки (штампов) и приспособлений, технологию и последовательность операции, переходы штамповки и параметры их реализации, характеристики оборудования, на котором производится обработка. Анализ данных показателей графически осуществляется с помощью профиля, на котором выделены три зоны устойчивого протекания технологического процесса: желательная, допустимая и нежелательная. Для автоматизации процесса анализа составлен алгоритм оценки надежности технологического процесса. Методика позволяет целенаправленно корректировать условие надежности технологического процесса путем внесения изменений в один или несколько показателей.

**Ключевые слова:** автоматизированное проектирование, анализ данных, система, управление, пластичность, штампуемость, дефекты, технологический процесс, листовая штамповка, надежность, коэффициент надежности, бездефектная штамповка, метод «профилей».

## SHEET-METAL FORMING TECHNICAL PROCESS'S MARGIN SAFETY EVALUATION METHODS ON DESIGN STAGE

Kashapova L.R., Pankratov D.L., Shibakov V.G.

*Branch of KFU in Naberezhnye Chelny, Naberezhnye Chelny, e-mail:pishite.lile@gmail.com*

Sheet-metal forming technical processes margin safety evaluation methods was worked out for degradation faulty production. This methods based on calculation and analysis of values of safety factors. Technical process's safety factors realize the main four systems of sheet-metal forming production: material characteristics; instruments (stamps) and tools properties; technology and operating series, stamping steps and their realization parameters and environment characteristics. Safety factors analysis carried out graphically by profile graded three zones of safety technical process: aimed, bearable and undesirable areas. Technical processes margin safety evaluation algorithm generated to automation data analysis. Methods allows to correct sheet-metal forming technical processes margin safety condition purposefully by modify one or more safety factors.

**Keywords:** automated engineering design, data analysis, system, guidance, plasticity, formability, defects, technical process, sheet-metal forming, margin of safety, safety factor, defect-free stamping, «profile» method.

Для обеспечения надежности технологического процесса на этапе его проектирования необходимо производить анализ исходных данных, к которым относится: информация о конструкции детали; о материале, из которого она должна изготавливаться; о механических и физических требованиях к ней; информация об оборудовании, на котором будет осуществляться штамповка; об инструменте и т.д. Данный этап является достаточно ответственным, т.к. от его результата зависит не только надежность протекания технологического процесса, но и рациональное использование ресурсов, увеличение объемов производства и т.п. Системы автоматизированного проектирования позволяют точно и быстро проводить анализ данных, решать сложные и наукоемкие задачи, т.е. эффективно управлять производством на любом из этапов жизненного цикла изделия.

Современные производства, в частности машиностроительное, являются человеко-машинными системами. Надежность их

функционирования в основном определяется достаточностью и согласованностью элементов и связей, образующих эту систему в плане достижения стоящей перед ней производственной цели.

В системе ЛШ, листоштамповочного производства, образующими элементами являются: М – обрабатываемый листовой материал; И – инструментальная оснастка (штампы) и приспособления; Т – технология, последовательность операций, переходов штамповки и параметры их реализации; О – оборудование (прессы и т.п.); П – персонал (наладчики, штамповщики, ремонтники и т.п.).

В человеко-машинной системе МИТОП (материал – инструмент – технология – оборудование – персонал) каждый элемент характеризуется множеством параметров, в той или иной степени влияющих на достижение стоящей перед ней производственной цели, – бездефектное изготовление листовой детали с заданной производительностью и экономической эффективностью. Считая,

что система листовой штамповки (ЛШ) обладает достаточно квалифицированным и мотивированным к производительному труду персоналом, далее будем рассматривать только согласованность технических элементов, которая должна обеспечивать ее надежное функционирование.

Под надежностью в рассматриваемом случае будем понимать свойство технологического процесса сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях технического обслуживания. Надежность является комплексным свойством [1].

Как было указано, элемент М – материал, характеризуется множеством интегральных параметров  $\{X, C\} \in M$ , каждый из которых состоит из единичных (неделимых) компонент. Например, X – химический состав, представлен содержанием легирующих железо компонент: C – углерод, Si – кремний и т.д. и вредных примесей: P – фосфора, S – серы и т.д.

Показатели химического состава можно представить рядом коэффициентов, отражающих количественный диапазон содержания примесей в стали. Это коэффициенты по содержанию углерода  $K_{M1}$ , серы  $K_{M2}$ , фосфора  $K_{M3}$ , кремния  $K_{M4}$ .

Основными механическими свойствами, влияющими на штампуемость, являются пластичность, прочность, коэффициент анизотропии свойств, твердость и т.д. Интегральному параметру множеству  $\{C\}$  принадлежит подмножество единичных значений, характеризующих физико-механические свойства металла: показатели сопротивления деформации ( $\sigma_{02}$  – предел текучести;  $\sigma_B$  – предел прочности), показатели пластичности ( $\delta$  – относительное удлинение,  $\psi$  – относительное сужение, I – глубина лунки по Эриксену) и другие показатели (НВ – твердость по Бринеллю, R – коэффициент анизотропии и т.д.).

Критерии, характеризующие механические свойства материала, представим в виде частных коэффициентов – это коэффициенты предела текучести  $K_{M5}$ , предела прочности  $K_{M6}$ , относительного удлинения  $K_{M7}$ , относительного сужения  $K_{M8}$ , анизотропии  $K_{M9}$ .

Значение единичных показателей множества  $\{X, C\}$ , как правило, регламентируются ГОСТом, отраслевыми стандартами, руководящими материалами, рекомендациями профессиональных справочников и другими информационными источниками. Они задаются либо диапазоном допустимых значений  $K_{min} \leq \{X, C\} \leq K_{max}$ , либо

ограничением сверху  $\{X, C\} \leq K_{max}$  или снизу  $K_{min} \leq \{X, C\}$ . Например, сталь 08Ю для глубокой вытяжки обладает значениями параметров из множества  $\{X, C\}$ , которые представлены в таблице 2, 2а и 5 в ГОСТ 9045-93 [2].

Элемент Т системы ЛШ представлен совокупностью операций и переходов штамповки, характеризующихся в свою очередь набором интегральных и составляющих их единичных параметров. Например, для операции вытяжки наиболее значимыми являются допустимые значения коэффициента вытяжки  $K_B$ , величина одностороннего зазора между матрицей и пуансоном z (неравномерность зазора  $\Delta z$  по периметру), допуски на толщину листа  $t_{-\delta}^{+\delta}$  и размеры заготовки, коэффициент трения  $\mu$  и т.д. Их можно обозначить коэффициентами трения между поверхностью заготовки и рабочих частей инструмента  $K_{T1}$ , допускаемых отклонений по толщине исходного листа  $K_{T2}$ , температурного режима  $K_{T3}$ , допускаемых отклонений по размерам исходного листа  $K_{T4}$  и предельным коэффициентом вытяжки  $K_{T5}$ .

Инструмент как элемент системы ЛШ характеризуется такими параметрами, как радиусы закруглений  $r_a, r_{bu}$ , шероховатость  $R_a, R_z$ , твердость рабочих поверхностей, степень их износа и т.д. Обозначим их следующим образом: коэффициент, отражающий твердость материала, из которого изготовлены рабочие части инструмента  $K_{Ш1}$ , коэффициент, отражающий значение шероховатости поверхностей рабочих частей инструмента  $K_{Ш2}$ , коэффициент, учитывающий износ рабочих частей инструмента  $K_{Ш3}$ , коэффициент, учитывающий несоосность верхней и нижней частей штампа  $K_{Ш4}$ , коэффициент, учитывающий неравномерность зазора между рабочими частями штампа  $K_{Ш5}$ .

Важным элементом, влияющим на надежность реализации технологического процесса листовой штамповки, является элемент системы О – прессовое оборудование. К числу определяющих параметров этого элемента относится номинальное усилие пресса  $P_n$ , закрытая высота, величина регулировки закрытой высоты, износ направляющих ползуна пресса, перекос ползуна и т.д. в данном случае, это будут коэффициенты, отражающие отклонения значений номинального усилия  $K_{06.1}$ , хода ползуна  $K_{06.2}$  и закрытой высоты пресса  $K_{06.3}$ .

Штампуемость стали (способность к пластическому формообразованию без разрушения при экономически целесообразной стойкости инструмента) сильно зависит от химического состава: чем больше угле-

рода и кремния в стали, тем хуже штампуемость. Поэтому для сталей, применяемых при холодной штамповке, особенно для глубокой вытяжки, следует иметь пониженное содержание вредных примесей (фосфора, серы), а также углерода и кремния (не более 0,08%) [3]. Данные о влиянии химического состава сталей на штампуемость приведены в таблице 1 в работе [4].

Кроме того, штампуемость зависит также от других факторов: физико-механических свойств и структуры деформируемого

металла, схемы и интенсивности напряженно-деформированного состояния, других технологических условий операции [5]. Перечисленные факторы могут выступать показателями надежности технологического процесса. По своему содержанию и структуре выделяют единичные, комплексные и интегральные показатели надежности. Применительно к оценке надежности технологического процесса листовой штамповки структура и содержание показателей приведена на рис. 1.



Рис. 1. Структура и содержание показателей надежности технологического процесса листовой штамповки

Информацию о значениях показателей (диапазон, ограничение сверху либо снизу) можно представить графически, используя так называемые методы «радара» или «профилей», что позволит объединить разноразмерные параметры процесса в один безразмерный показатель – интегральный коэффициент надежности и объективно оценивать и сравнивать технологические процессы [6]. График, построенный методом «профилей», по рассматриваемой методике в общем виде будет иметь вид, представленный на рис. 2.

Приведенные показатели можно разделить на два типа:

а) показатели, увеличение значений которых повышает надежность процесса. Например, коэффициенты относительного сужения и относительного удлинения, коэффициент температурного режима, предельный коэффициент вытяжки и т.д.;

б) показатели, увеличение значений которых снижает надежность технологического процесса. К таким показателям относятся: коэффициент по содержанию углерода, коэффициенты предела текучести и предела прочности, коэффициент трения, коэффициент, отражающий значение шероховатости поверхностей рабочих частей штампа и т.д.

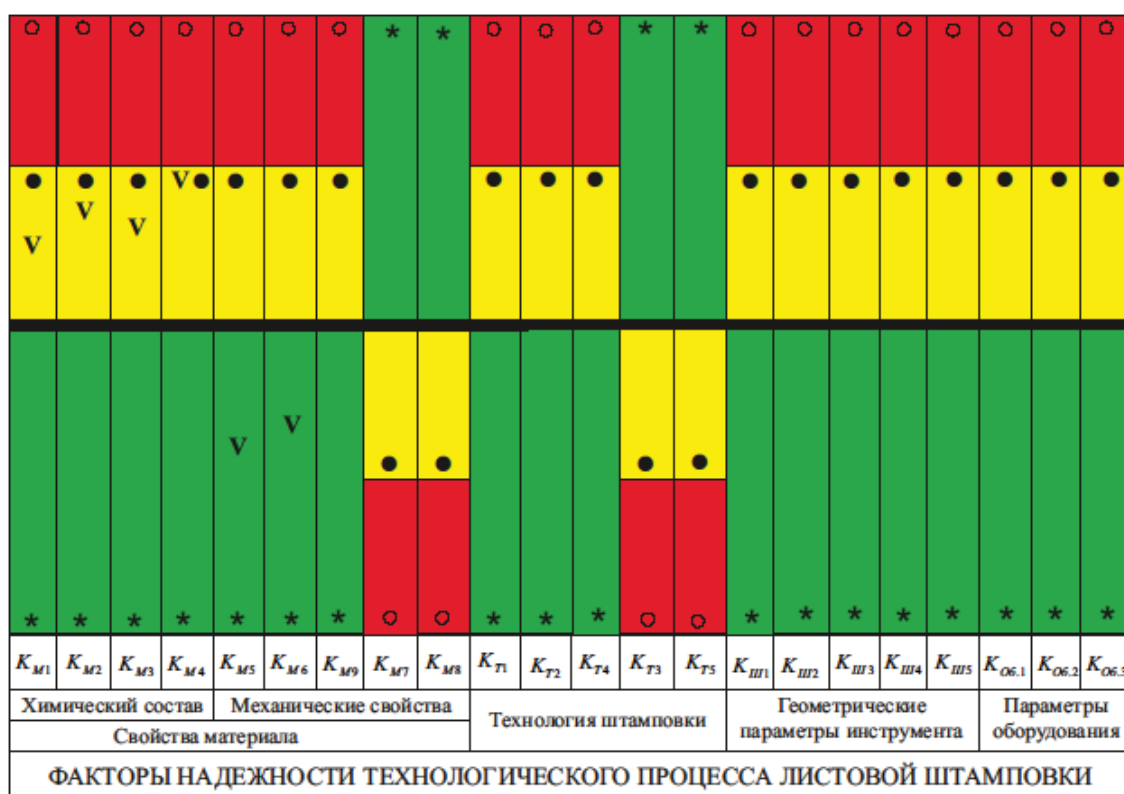


Рис. 2. Профиль показателей надежности технологического процесса  
 \* – надежный технологический процесс; ● – процесс с возможностью периодического возникновения брака; ○ – процесс с систематическим браком

Таким образом, для некоторых показателей протеканию технологического процесса без возникновения брака будет способствовать их минимальное значение, а для некоторых – максимальное. Исходя из этого, профиль показателей надежности технологического процесса листовой штамповки разделен на три зоны, они выделены цветом: зеленая – область, в которой желательно находиться значениям показателей надежности для устойчивого протекания технологического процесса; желтая – область, в которую допустимо попадание значений показателей надежности для устойчивого протекания технологического процесса, начинается от средней линии и продолжается до середины желтой области; красная – область, попадание в которую значениям показателей надежности нежелательно, т.к. вероятность устойчивого протекания процесса намного ниже (или равна 0), чем при попадании в область зеленого или желтого цвета.

Алгоритм оценки надежности технологического процесса приведен на рис. 3 в виде блок-схемы.

В качестве примера рассмотрим штамповку лонжеронов, изогнутых в вертикальной плоскости (применяются в конструкции

седельных тягачей таких как, например, автомобиль КАМАЗ модели 5460). На рисунке 2 значком V отмечены значения параметров надежности технологического процесса штамповки лонжеронов. На профиле видно, что большинство показателей находится в области желтого цвета (допустимо), а символ V – в непосредственной близости от символа ●, т.е. близок к линии технологического процесса с возможностью периодического возникновения брака. Полученный результат подтверждает пробная штамповка на производстве: на лонжеронах возникают дефекты в местах выемок: в зоне растяжения (происходит разрыв листа и вмятина) и в зоне свертывания (затягивание излишнего металла).

Для обеспечения надежности технологического процесса его показателями необходимо управлять. С этой целью прежде необходимо выделить те факторы, которые находятся в количественной зависимости друг от друга. В основном результат формоизменяющих операций напрямую зависит от свойств материала и технологии штамповки. Количественно эти причины можно представить в виде значений коэффициентов показателей надежности технологического процесса. Причем данные показатели находятся в некоторой зависимости друг от друга.

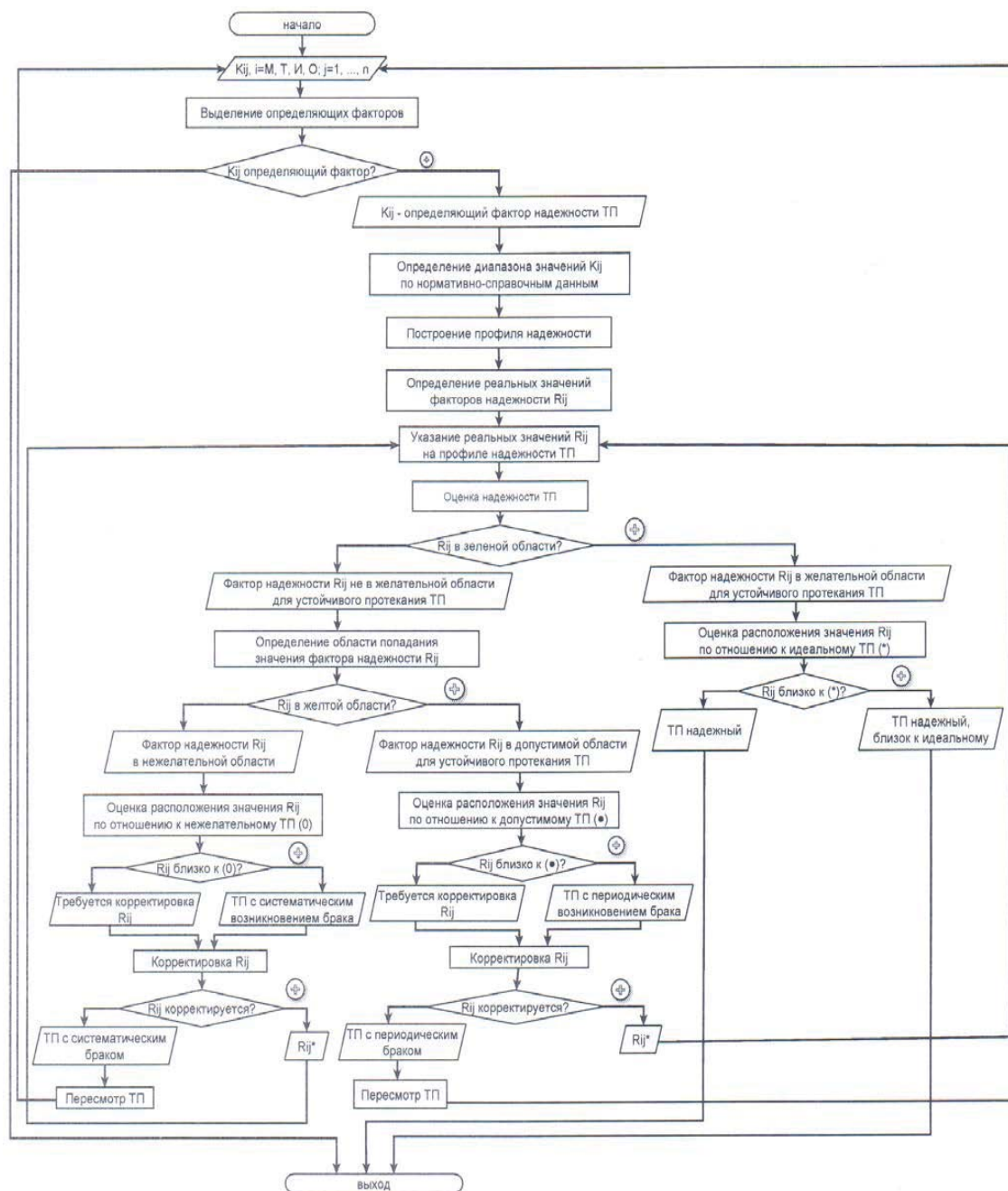


Рис. 3. Алгоритм оценки надежности технологического процесса

Предел текучести металла зависит от температуры [7]. При ее повышении, предел прочности увеличивается вследствие процессов старения и при температуре 250-300°C достигает наибольшей величины. Предел прочности стали, как и ее твердость, также зависит от содержания углерода. Уменьшение анизотропии свойств достигается металлургическими способами (уменьшением в стали сульфидов и других неметаллических включений, изменением условий горячей пластической деформации и

др.) [8]. Относительное сужение непосредственно связано с химическим составом материала. При одной и той же твердости значения выше у легированной, чем у нелегированной стали.

Представим взаимосвязь указанных выше показателей в виде матрицы, изображенной на рис. 4.

Элементами матрицы будут показатели надежности. Для удобства представим ее упрощенно, т.е. укажем лишь взаимозависимые показатели.

+/-	$K_{M1}$	$K_{M5}$	$K_{M6}$	$K_{M8}$	$K_{M9}$	$K_{T1}$	$K_{T2}$	$K_{T3}$	$K_{Ш3}$
$K_{M1}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$K_{M5}$	+	-	-	-	-	-	+	-	-
$K_{M6}$	+	-	-	-	-	-	-	+	-
$K_{M8}$	-	-	-	-	-	-	+	-	-
$K_{M9}$	-	-	-	-	-	-	-	+	-
$K_{T1}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$K_{T2}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$K_{T3}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$K_{Ш3}$	+	-	-	-	-	+	-	-	-

Рис. 4. Матрица взаимосвязи параметров надежности:  
«+» – взаимосвязь есть; «-» – взаимосвязь отсутствует

Таким образом, технологическим процессом можно явно или косвенно управлять, корректируя один или несколько коэффициентов, которые в свою очередь «скорректируют» другие показатели. Например, изменив  $K_{M1}$ , можно скорректировать три коэффициента  $K_{M5}$ ,  $K_{M6}$  и  $K_{Ш3}$ . Условие бездефектной штамповки для конкретного изделия можно будет получить путем определения показателей надежности (номинальных и реальных), построения профиля надежности и оценки показателей в зависимости от того, в которую из областей (желтую, красную или зеленую) они попадают. При этом данная методика позволяет целенаправленно корректировать условие надежности технологического процесса путем внесения изменений в один или несколько параметров.

**Список литературы**

- ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения, 64с.
- ГОСТ 9045–93. Прокат тонколистовой холоднокатаный из низкоуглеродистой качественной стали для холодной штамповки. Технические условия, 12с.
- Зуев В.М. Термическая обработка металлов: учеб. для технических училищ / Зуев В.М. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1981. – 296с.
- Кашапова Л.Р., Панкратов Д.Л., Утяганов Р.Ф., Шибачков В.Г. Методика прогнозирования надежности технологического процесса изготовления деталей методом листовой штамповки // Информационные технологии. Автоматизация. Актуализация и решение проблем подготовки высококвалифицированных кадров (ИТАП-2014): международная научно-практическая конференция. – Набережные Челны, 2014. – С.129-137.
- Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке / Романовский В.П. – 6-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Машиностроение, 1979. – 520 с.
- УДК 658.56 Разностный метод оценки качества автомобилей. Х.А. Фасхиев, И.Д. Валеев // Автомобильная промышленность. – 2007. – №11. – С.3-7.
- Болдырев А.М. Сварочные работы в строительстве и основы технологии металлов: учебник / Болдырев А.М., Орлов А.С. – М.: АСВ, 1994. – 432с.

- Аникеева О.В. Методический комплекс для обеспечения параметрической надежности технологического оборудования / О.В. Аникеева // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – №1 – С.39-47.

**References**

- Industrial product dependability. General concepts Terms and definitions [Nadezhnost v tekhnike. Osnovnye ponyatiya. Terminy i opredeleniya], GOST 27.002–89 RU, introduced 01.07.1990
- Cold-rolled thin sheets of low-carbon steel for cold stamping. Specifications [Prokat tonkolistovoy kholodnokatanyy is nizkouglerodistoy kachestvennoy stali dlya kholodnoy shtampovki. Tekhnicheskie usloviya], GOST 9045–93 RU, introduced 01.01.1997
- Zuev V.M. Termicheskaya obrabotka metallov [Technical metal forming], Moscow. High school, 1981, 296p.
- Kashapova L.R., Pankratov D.L., Utyaganov R.F., Shiba-kov V.G. Metodika prognozirovaniya nadezhnosti tekhnologicheskogo processa izgotovleniya detaley metodom listovoy shtampovky [Sheet-metal forming technical process’s margin safety forecasting method], Naberezhnye Chelny, 2014, pp.129-137.
- Romanovskiy V.P. Spravochnik po kholodnoy shtampovke [Cold forging reference guide]. Petersburg, Machine-Building, 1979, 520p.
- Faskhiev K.H., Valeev I.D. Raznostnyy metod otsenki kachestva avtomobiley – Avtobodilnaya promyshlennost, 2007, no.11, pp.3-7.
- Boldyrev A.M., Orlov A.S. Svarochnye raboty v stroitelstve i osnovy tekhnologii metallov [Welding works in building and metal technologies basics], Moscow, ASV, 1994, 432p.
- Anikeeva O.V. Russian Internet Journal of Industrial Engineering. 2014, no.1, pp.39-47, available at: <http://www.indust-engineering.ru/>

**Рецензенты:**

Симонова Л.А., д.т.н., профессор, зам. директора по научной деятельности Набережно-челнинского филиала Казанского Федерального Университета, г. Набережные Челны;  
Асташенко В.И., д.т.н., профессор Набережночелнинского филиала Казанского Федерального Университета, г. Набережные Челны.

Работа поступила в редакцию 29.07.2014.