

УДК 621.7.04

DOI: 10.12737/article_5a8ef9cb057f82.61176738

В.А. Демин, д.т.н.

(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
105005, г. Москва, 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1)

E-mail: va_demin@bk.ru

Управление качеством заготовок, получаемых обработкой металлов давлением

Представлены современные требования к заготовкам, полученным обработкой металла давлением. Приведены данные по точности и шероховатости поверхности заготовок из проката. Проанализированы различные критерии разрушения, применяемые для анализа процесса штамповки. Показано, что испытание металла по Эриксену нельзя использовать для оценки предельного коэффициента вытяжки.

Ключевые слова: машиностроение; обработка металлов давлением; качество заготовок.

V.A. Demin, D. Eng.

(Bauman State Technical University of Moscow
Build.1., 5, 2-d Baumanskaya, Moscow, 105005)

Quality control of blanks manufactured by metal forming

Current requirements to blanks manufactured by metal forming are presented. There are shown data on accuracy and surface roughness of rolled blanks. Different fracture criteria used for the analysis of press forming are analyzed. It is shown that metal tests on Eriksen should not be used for the estimate of the limiting drawing ratio.

Keywords: mechanical engineering; metal processing; blank quality.

Современное машиностроение требует получения заготовок с заданными характеристиками, такими как: размер зерна, разнотолщинность, чистота поверхности, запас пластичности после обработки металла давлением [1]. Выполнение этих требований увеличивает качество получаемых заготовок и поэтому, в настоящее время, актуальной задачей является управление качеством в процессе получения заготовок.

Обработкой давлением получают заготовки с помощью проката,ковки и штамповки.

Основные виды проката:

– прокат листовой холоднокатаный и горячекатаный;

– прокат круглого сечения и квадратного сечения.

Прокат листовой холоднокатаный толщиной от 0,35 до 5,0 мм по ГОСТ19904-90

подразделяется:

1) *по точности изготовления:*

– по толщине: ВТ – высокая, АТ – повышенная, БТ – нормальная;

– по ширине: ВШ – высокая, АШ – повышенная, БШ – нормальная (листовой прокат);

– по длине: (листовой прокат, кроме прокатанного полистно) ВД – высокая, АД – повышенная, Д – нормальная;

2) *по плоскостности* (листовой прокат): ПО – особо высокая, ПВ – высокая, ПУ – улучшенная, ПН – нормальная;

3) *по характеру кромки:* О – обрезаемая, НО – необрезаемая.

Разнотолщинность проката в одном поперечном сечении не должна превышать половины суммы предельных отклонений по толщине, которые приведены в табл. 1.

1. Предельные отклонения по толщине

Толщина проката	Предельное отклонение по толщине при ширине проката											
	До 1000 включительно			Св. 1000 до 1500 включительно			Св. 1500 до 2000 включительно			Св. 2000 до 2350 включительно		
	ВГ	АГ	БГ	ВГ	АГ	БГ	ВГ	АГ	БГ	ВГ	АГ	БГ
От 0,3 до 0,4	±0,02	±0,03	±0,04	±0,03	±0,04	±0,05						
Св 0,4 до 0,5	±0,03	±0,04	±0,05	±0,04	±0,05	±0,06						
Св 0,5 до 0,65	±0,04	±0,05	±0,06	±0,05	±0,06	±0,07	±0,06	±0,07	±0,09			
Св 0,65 до 0,9	±0,04	±0,06	±0,08	±0,05	±0,06	±0,08	±0,07	±0,09	±0,11			
Св 0,9 до 1,2	±0,05	±0,08	±0,10	±0,06	±0,09	±0,11	±0,07	±0,10	±0,13			
Св 1,2 до 1,4	±0,06	±0,09	±0,10	±0,07	±0,10	±0,12	±0,08	±0,12	±0,15			
Св 1,4 до 1,5	±0,07	±0,10	±0,12	±0,08	±0,11	±0,13	±0,09	±0,13	±0,16			
Св 1,5 до 1,8	±0,08	±0,12	±0,14	±0,09	±0,12	±0,15	±0,10	±0,14	±0,17	±0,14	±0,17	±0,21
Св 1,8 до 2,0	±0,08	±0,12	±0,15	±0,09	±0,13	±0,16	±0,10	±0,15	±0,18	±0,15	±0,18	±0,22
Св 2,0 до 2,5	±0,10	±0,14	±0,17	±0,11	±0,15	±0,18	±0,12	±0,18	±0,20	±0,18	±0,20	±0,23
Св 2,5 до 3,0	±0,12	±0,16	±0,18	±0,13	±0,16	±0,19	±0,14	±0,19	±0,22	±0,19	±0,21	±0,25
Св 3,0 до 3,2	±0,13	±0,17	±0,19	±0,14	±0,18	±0,21	±0,18	±0,20	±0,23	±0,20	±0,22	±0,27
Св 3,2 до 4,0	±0,14	±0,18	±0,20	±0,16	±0,19	±0,22	±0,19	±0,21	±0,24	±0,21	±0,23	±0,28
Св 4,0 до 5,0	±0,16	±0,19	±0,20	±0,18	±0,20	±0,23	±0,20	±0,22	±0,25	±0,23	±0,25	±0,30

Характеристика качества отделки поверхности тонколистового холоднокатаного проката из малоуглеродистой стали регламентируется ГОСТ 9045-93 и приведена в табл. 2.

2. Характеристика качества отделки поверхности

Группа отделки	Характеристика качества отделки	
II	На обеих сторонах проката не допускаются дефекты, глубина которых превышает 1/2 суммы предельных отклонений по толщине и выводящие за минимальные размеры по толщине, а также цвета побежалости на расстоянии, превышающем 50 мм от кромок. На лицевой стороне (лучшей по качеству поверхности) не допускаются риски и царапины длиной более 50 мм	
III	На обеих сторонах не допускаются дефекты, глубина которых превышает 1/2 суммы предельных отклонений по толщине и выводящие прокат за минимальные размеры по толщине:	
	IIIа цвета побежалости не допускаются на расстоянии более 200 мм от кромок	IIIб цвета побежалости допускаются по всей поверхности проката

В ГОСТ 9045-93 говорится о том, что качество поверхности тонколистовой стали, обжатой в холодном состоянии для вытяжки (CR3 и CR4), может быть неодинаковым в случае закрытых и открытых деталей. Поверхность тонколистовой стали, предназначенной для изготовления закрытых деталей, может иметь поры, незначительные выемки, слабые штрихи или царапины, а также незначительное обесцвечивание. Поверхность тонколистовой стали, предназначенной для изготовления открытых деталей, должна быть относительно свободна от указанных выше дефектов. Если не оговорено иначе, осмотру подвергают только одну сторону листа. Тонколистовую сталь, обжатую в холодном состоянии, обычно выпускают с матированной поверхностью, которая пригодна для последующей обычной декоративной окраски, при этом подобную сталь не рекомендуют для электрохимических покрытий. При формоизменении тонколистовой стали, обжатой в холодном состоянии, при изготовлении из нее деталей может произойти ухудшение состояния поверхности некоторых локализованных зон, что может потребовать ручной обработки подобных участков деталей для подготовки поверхности к последующему применению изделия.

Так же отмечается, что в случае удаления поверхностных дефектов зачисткой мелкозернистым наждачным или войлочным кругом с наждачной пастой на поверхности проката

допускаются следы абразивной зачистки, а глубина зачистки не должна выводить прокат за минимальный размер по толщине.

Прокат сортовой стальной горячекатаный круглый по ГОСТ 2590-2006 подразделяют:

– по точности прокатки: особо высокой – АО1; высокой – А1, А2, А3; повышенной – В1; обычной – В1, В2, В3, В4, В5;

– по длине: мерной – МД; мерной с немерной длиной – МД1; кратной мерной – КД; кратной мерной с немерной длиной – КД1; немерной – НД; ограниченной в пределах немерной – ОД; ограниченной с немерной длиной – ОД1; в мотках – НМД;

– по предельным отклонениям по длине проката мерной и кратной мерной длины по группам: БД и ВД;

– по кривизне на классы: I, II, III, IV.

Величины допусков на круглый прокат приведены в табл. 3.

Улучшить качество штампованных заготовок можно благодаря совершенствованию технологии и разработке таких переходов, которые обеспечат наилучшее расположение волокон металла в заготовке. Например, в работе [2] показано, что в металле с волокнистым строением микроструктуры (рис.1) наблюдается анизотропия механических свойств, которая может оказывать существенное влияние на износ при истирании. Причем уменьшение износа зависит от угла выхода волокон на поверхность заготовки.

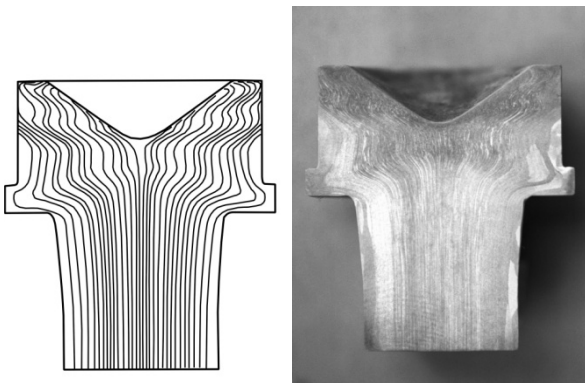


Рис. 1. Металл с волокнистым строением микроструктуры

Были проведены эксперименты на заготовках из стали 45 с шероховатостью образцов и пальца $Ra 1,25$. Износ оценивали при помощи измерения массы образца до и после эксперимента.

Экспериментально установлено, что при штамповке поковок с углом выхода волокон макроструктуры на контактную поверхность в

диапазоне от 0 до 15°, может быть получен минимальный износ при истирании данных поверхностей, что увеличивает срок службы полученных деталей.

Одним из основных критериев качества заготовок полученных обработкой давлением является отсутствие технологических отказов в процессе штамповки [3]. Для прогнозирования разрушения используются различные критерии.

Сегодня, для анализа процессов объемной штамповки, наибольшее распространение получила программа QForm VX, в которой используется критерий разрушения Кокрафта – Лэтэма.

$$\Psi = \int_0^{\bar{\varepsilon}_p} \frac{\sigma_1^+}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon}_p,$$

где $\bar{\varepsilon}_p$ – приращение накопленной пластической деформации; σ_1^+ – максимальное растягивающее напряжение; $\bar{\sigma}$ – интенсивность напряжений.

Однако в работе [4] показано, что нормализованный критерий Кокрофта–Лэтэма не позволяет выполнить количественный прогноз разрушения материала для произвольного технологического процесса холодной штамповки. Критерий можно использовать только для качественной оценки сходных технологических процессов, в которых напряженное состояние и пути деформирования опасных точек отличаются незначительно.

В настоящее время для прогнозирования разрушения металла в процессе обработки давлением так же используют критерии Калпина и Колмогорова.

Критерий Калпина:

$$\Psi = \int_0^{\bar{\varepsilon}_0} \left(n\varphi_0 \varepsilon_0^{n-1} + \frac{\varphi_0 \varepsilon_{np}^n(\eta_k)}{\varepsilon_{np}(\eta_k)} \right) d\varepsilon_0 < 1,$$

где $\varepsilon_{np}(\eta_k)$ – предельное значение накопленной деформации; $\bar{\varepsilon}_0$ – степень деформации, накопленная к концу процесса формоизменения; φ_0, n – коэффициенты.

Критерий Колмогорова:

$$\Psi = \int_0^{\bar{\varepsilon}_0} \frac{d\bar{\varepsilon}_0}{\varepsilon_0^*}$$

где ε_0^* – предельная интенсивность логарифмической деформации для заданного напряженно-деформированного состояния.

3. Допуски на диаметр круглого проката

Номинальный диаметр d , мм	Предельное отклонение, мм, при точности прокатки					
	A1	B1	B1	A01	A2	B2
От 5 до 9	+0,1 -0,2	+0,1 -0,5	+0,3 -0,5	-	±0,15	±0,4
10	+0,1 -0,3	+0,1 -0,5	+0,3 -0,5	-	±0,15	±0,4
От 11 до 12	+0,1 -0,3	+0,1 -0,5	+0,3 -0,5	-	±0,15	±0,4
От 13 до 15	+0,1 -0,3	+0,1 -0,5	+0,3 -0,5	±0,12	±0,20	±0,4
От 16 до 17	+0,1 -0,3	+0,1 -0,5	+0,3 -0,5	±0,12	±0,20	±0,5
От 18 до 19	+0,1 -0,3	+0,1 -0,5	+0,3 -0,5	±0,15	±0,20	±0,5
От 19 до 22	+0,1 -0,4	+0,2 -0,5	+0,4 -0,5	±0,15	±0,20	±0,5
От 23 до 25	+0,1 -0,4	+0,2 -0,5	+0,4 -0,5	±0,15	±0,25	±0,5
От 25 до 28	+0,1 -0,4	+0,2 -0,7	+0,3 -0,7	±0,15	±0,25	±0,6
От 29 до 30	+0,1 -0,5	+0,2 -0,7	+0,3 -0,7	±0,15	±0,25	±0,6
От 31 до 33	+0,1 -0,5	+0,2 -0,7	+0,4 -0,7	±0,15	±0,30	±0,6
От 34 до 35	+0,1 -0,5	+0,2 -0,7	+0,4 -0,7	-	±0,30	±0,6
От 36 до 40	+0,1 -0,5	+0,2 -0,7	+0,4 -0,7	-	±0,30	±0,8
От 41 до 48	+0,1 -0,5	+0,2 -0,7	+0,4 -0,7	-	±0,40	±0,8
50	+0,1 -0,7	+0,2 -1,0	+0,4 -1,0	-	±0,40	±0,8
52	+0,1 -0,7	+0,2 -1,0	+0,4 -1,0	-	±0,40	±1,0
От 53 до 58	+0,1 -0,7	+0,2 -1,0	+0,4 -1,0	-	±0,50	±1,0
От 60 до 78	+0,1 -0,9	+0,3 -1,1	+0,5 -1,1	-	±0,50	±1,0
80	+0,3 -1,0	+0,3 -1,3	+0,5 -1,3	-	-	±1,0
От 82 до 97	+0,3 -1,0	+0,3 -1,3	+0,5 -1,3	-	-	±1,3
100	-	+0,4 -1,7	+0,6 -1,7	-	-	±1,3
От 105 до 115	-	+0,4 -1,7	+0,6 -1,7	-	-	±1,5
120	-	+0,6 -2,0	+0,8 -2,0	-	-	±1,5
От 125 до 155	-	+0,6 -2,0	+0,8 -2,0	-	-	±2,0
160	-	-	+0,9 -2,5	-	-	±2,0

От 165 до 200	-	-	+0,9 -2,5	-	-	±2,5
От 210 до 220	-	-	+1,2 -3,0	-	-	±3,0
От 230 до 250	-	-	+1,2 -3,0	-	-	±4,0
От 260 до 270	-	-	+2,0 -4,0	-	-	±6,0

В работе [5] проведено сравнение перечисленных выше критериев разрушения для операции «отбортовка». Выбор данной операции объясняется тем, что известна точка, в которой происходит разрушение.

Результаты расчетов показаны на рис. 2. Как видно на рис. 2 критерий разрушения Колмогорова показывает результаты, максимально приближенные к результатам эксперимента. По критерию Кокрафта–Лэтэма место разрушения рассчитано правильно, но результат занижен. По критерию Калпина место разрушения определено неверно.

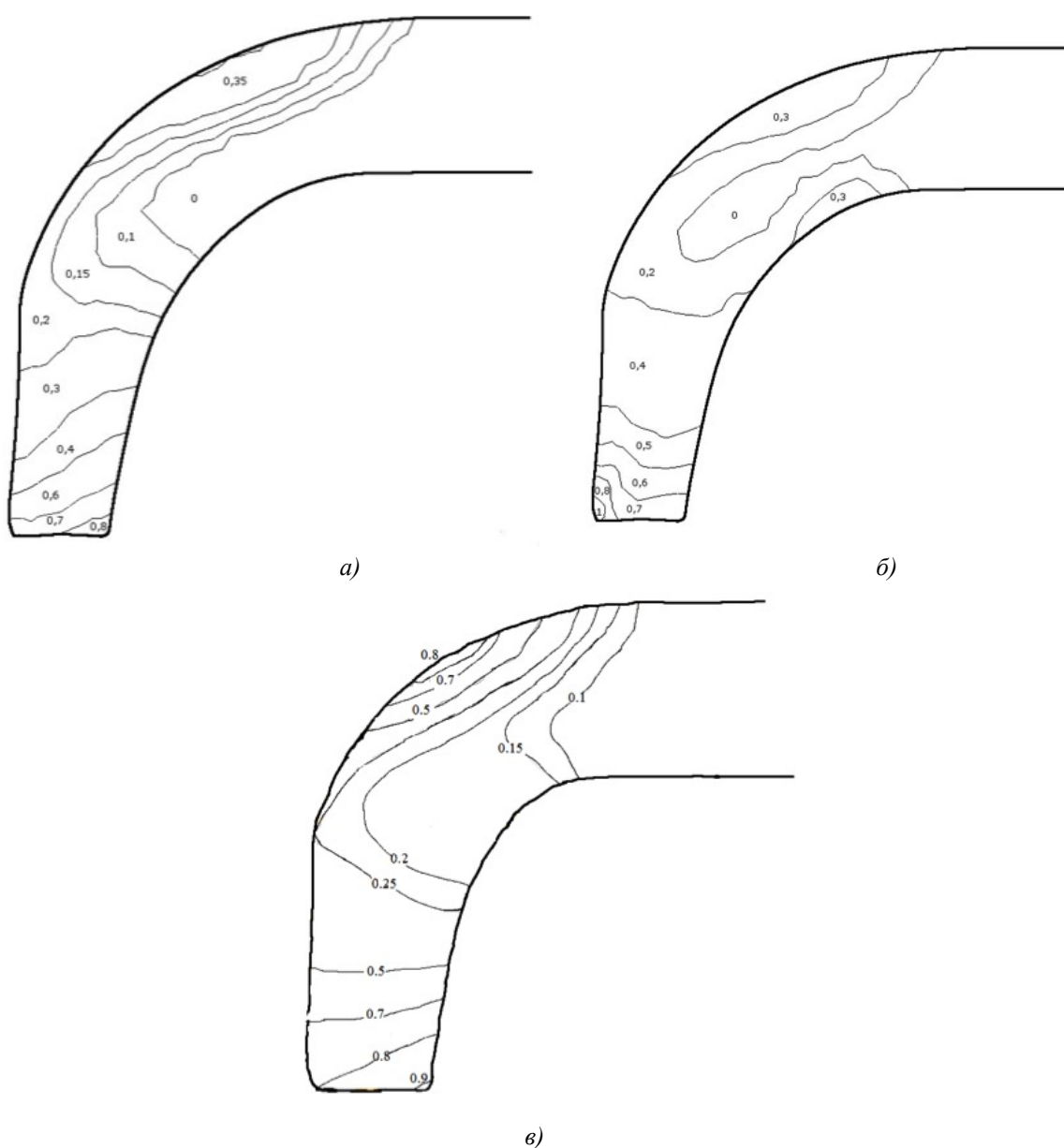


Рис. 2. Результаты расчета по критериям разрушения:

а – критерий разрушения Кокрафта–Лэтэма; *б* – критерий разрушения Калпина; *в* – критерий разрушения Колмогорова

Приведенные критерии разрушения получены авторами с применением теории течения, но в некоторых случаях для анализа процесса деформирования лучше использовать теорию кратковременной ползучести. Поэтому интересна работа [6], где принято, что процесс штамповки протекает в условиях вязкого течения и с учетом повреждаемости уравнения состояния, описывающее поведение материала, подчиняющегося энергетической теории ползучести и повреждаемости.

В результате для материала, подчиняющегося деформационному критерию разрушения, предлагается использовать следующий критерий:

$$\omega_e^{cp} = \frac{C_1}{\varepsilon_{e\text{ пр}}^{cp}} \ln \left(1 + \frac{b^2}{a^2} t^{2f} \right),$$

где ω_e^{cp} – повреждаемость; $\varepsilon_{e\text{ пр}}^{cp}$ – предельная деформация; t – время; C_1, a, b, f – величины, характеризующие геометрию образца.

Однако в работе [6] не приведены результаты экспериментальной проверки полученного критерия.

При проектировании технологических процессов вытяжки цилиндрических и коробчатых деталей основным параметром, определяющим качество получаемых заготовок, является коэффициент вытяжки:

$$K = D/d,$$

где d, D – диаметры детали и заготовки, соответственно.

При определении предельного коэффициента вытяжки используют таблицы значений K или эмпирические формулы. Качественную характеристику металла на пригодность к вытяжке определяют по ГОСТ 10510-80 «Метод испытания на выдавливание листов и лент по Эриксену». В работе [7] рассмотрена связь между группой штампуемости стали для холодной штамповки, определяемой испытаниями по Эриксену и предельным коэффициентом вытяжки.

Проведены расчеты предельного коэффициента вытяжки и глубины лунки для сталей DC03, DC04, DC05 и стали 08. По результатам расчета построены графики, приведенные на рис. 3 и 4.

Из рис. 3 и 4 видно, что, например, сталь DC04 имеет лучшую штампуемость по Эриксену, чем сталь DC03, а предельный коэффициент вытяжки меньше.

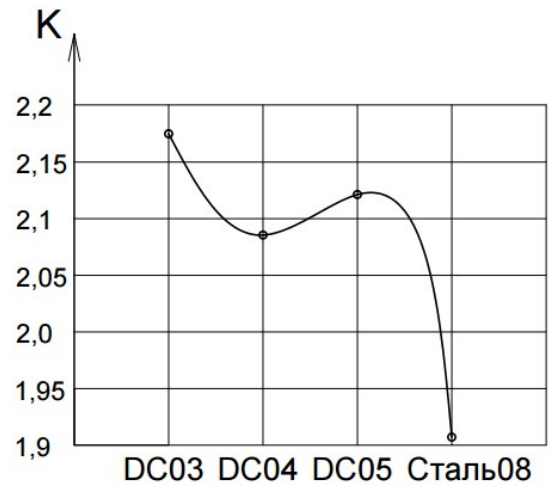


Рис. 3. Зависимости предельного коэффициента вытяжки от марки стали

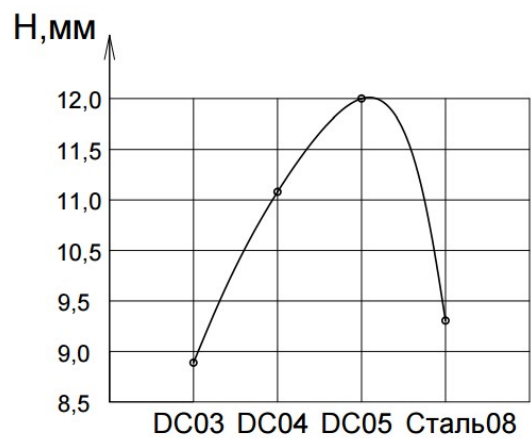


Рис. 4. Зависимость глубины лунки при испытании по Эриксену от марки стали

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Демин, В.А. Проектирование инновационных технологий в обработке металлов давлением // Научёкие технологии в машиностроении. – 2017. – №8 (74). – С. 3–6.
2. Алленов, М.Г., Белокуров, О.А. Влияние направления волокон макроструктуры стальных поковок на износ полученных из них изделий // Вестник МГТУ Станкин. – 2016. – № 4 (39). – С. 67–70.
3. Демин, В.А. Проектирование процессов толстолистовой штамповки на основе прогнозирования технологических отказов. – М.: Машиностроение-1, 2002. – 186 с. ISBN 5-94275-035-1
4. Власов, А.В. О применении критерия Кокрофта-Лэтэма для прогнозирования разрушения при холодной объемной штамповке // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – Вып. 11. – Ч. 1. – С. 46–58.
5. Демин, В.А., Ромасенко, А.В., Костылев, В.А. Отбортовка отверстия под резьбу более М6 // Заготовительные производства в машиностроении. – 2017. – Т.15. – №8. – С. 357–360.

6. Ларин, С.Н., Платонов, В.И., Куприн, Е.П., Яковлев, С.С. (мл). Подход к оценке повреждаемости при деформировании стрингерных конструкций с цилиндрическими каналами по различным теориям ползучести и повреждаемости // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – Вып. 3. – С. 3–14.

7. Демин, В.А. Исследование связи между предельным коэффициентом вытяжки и группой штампуемости стали для холодной штамповки // Известия Тульского государственного университета. – 2017. – Вып. 12. – Ч. 2. – С. 262–268.

REFERENCES

1. Demin, V.A. Design of innovation technologies in metal forming // *Science Intensive Techniques in Mechanical Engineering*. – 2017. – No.8 (74). – pp. 3-6.

2. Allenov, M.G., Belokurov, O.A. Macrostructure fiber direction impact in steel forged pieces upon wear of products made of them // *Bulletin of STANKIN MSTU*. – 2016. – No.4 (39). – pp. 67-70.

3. Demin, V.A. *Thick-Sheet Stamping Design Based on Technological Failures Prediction*. – М.: Mechanical Engineering-1, 2002, - pp. 186. ISBN 5-94275-035-1

4. Vlasov, A.V. On Cocroft-Latham criterion application for failure prediction at cold die forging // *Bulletin of Tula State University. Engineering Sciences*. – 2017. – Edition 11. – Part.1. – pp. 46-58.

5. Demin, V.A., Romasenko, A.V., Kostylev, V.A. Hole folding for threading higher of M6 // *Pre-Production in Mechanical Engineering*. – 2017. – Vol.15. – No.8. – pp. 357-360.

6. Larin, S.N., Platonov, V.I., Kuprin, E.P., Yakovlev, S.S. (young). Approach to damageability estimate at deformation of stringer structures with cylindrical channels on different areas of creep and damageability // *Proceedings of Tula State University. Engineering Sciences*. – 2016. – Edition 3. – pp. 3-14.

7. Demin, V.A. Investigation of ties between limiting drawing ratio and group of steel stamping for cold forming // *Proceedings of Tula State University*. – 2017. – Edition 12. – Vol.2. – pp. 262-268.

Рецензент д.т.н. Б.М. Базров

УДК 621.9: 658.512

DOI: 10.12737/article_5a8ef9cb7d0fc9.83528290

М.Л. Хейфец, д.т.н., В.И. Бородавко, ген. директор, А.М. Пынькин, зам. ген. директора, Н.Л. Грецкий, н.с. (ГНПО «Центр» НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь)
E-mail: mlk-z@mail.ru

Технологический процесс электронно-лучевой сварки пакета лопаток паровых турбин

Предложена технология изготовления пакета лопаток паровых турбин из жаропрочной высоколегированной трудносвариваемой стали мартенситного класса. Описано преимущество применения электронно-лучевой сварки при сборке пакета лопаток вместо традиционного электродугового способа сварки в защитной среде. Рассмотрена специально спроектированная технологическая оснастка необходимая для автоматизации процесса сварки.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка; пакеты лопаток паровых турбин; концентрированные потоки энергии; трудно-свариваемые стали мартенситного класса.

M.L. Heifets, D. Eng., V.I. Borodavko, general Director, A.M. Pynkin, deputy general Director, N.L. Gretskey, r. a., (SSPC "Center" NAS of Belarus, Minsk, Belarus)

Engineering procedure in electron-beam welding of blade packet for steam turbines

A technology for manufacturing a steam turbine blade packet made of heat-resistant high-alloy hard-to-weld steel of a martensitic class is offered. The advantage of electron-beam welding use at the assembly of a blade packet instead of a common electric arc welding method in protective environment is described. A technological tooling specially designed essential for welding process automation is considered. There are shown results of laser scanning a blade packet geometry with the aid of NikonMetrology MCAx40+ coordinate measuring arm with the further computer analysis of results obtained in applied Focus software which has shown that thermal deformations are within the limits of a tolerance for the mentioned operation and exclude completely further processing.

The application of electron-beam welding at manufacturing a blade packet allows increasing assembly quality, decreasing defects and cost price of an engineering process.

Keywords: electron beam welding; packets of steam turbine blades; concentrated energy flows; hard-to-weld steels of martensitic class.