

РАЗДЕЛ II ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК621.735.32+621.73.042

Белевитин В. А.
Смирнов Е. Н.
Коваленко С. Ю.
Суворов А. В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРЁХЛУЧЕВОГО СЛИТКА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Задача выпуска конкурентоспособной продукции обуславливает необходимость создания производства нового типа, способного в сжатые сроки перестраиваться на изготовление в требуемом количестве новой продукции востребованного качества.

На предприятиях, в том числе металлургического и машиностроительного профиля, значительное количество времени и средств затрачивается как на проектирование в целом, так и на разработку (проектирование, оптимизацию) технологических процессов в частности. Общепринятым считается, что современное предприятие будет конкурентоспособным, если время от идеи проектирования нового технологического процесса до выхода первой промышленной партии продукции повышенного качества, полученной с его помощью, составляет не более 1,5 лет [1]. При этом к обязательному выполнению следует условие, когда новый технологический процесс должен обеспечивать получение продукции востребованного на рынке качества при минимальных затратах труда, материалов и времени.

Трансформируя вышеизложенное к реалиям сегодняшнего дня, можно с высокой степенью правомочности сформулировать одну из главных задач, стоящую при разработке новых технологий и развитии любого производства, в следующем виде: проектирование наукоёмких ресурсосберегающих технологий, обеспечивающих, в рамках оптимизированных технологических циклов, производство продукции как с минимально возможным потреблением для технологических нужд энергетических и материальных ресурсов, так и минимальной техногенной нагрузкой на окружающую среду.

Современный взгляд на качество, как на процесс, позволяет использовать его в виде динамической характеристики многих предметов, явлений и технологий. В то же время, качество также может быть представлено в безразмерных индексах, относительных единицах и, следовательно, обладает универсальностью в плане сравнения. Собственно, и в самом понятии «качество продукции» отражается не только её конечное материальное и стоимостное содержание, а и весь комплекс технических, маркетинговых, управленческих и технологических мероприятий, формирующих это обобщенное свойство продукции.

При разработке ресурсосберегающих технологий добиться одновременной и максимально возможной оптимизации всех компонентов технологических процессов, а именно материало-, трудо-, энерго- и фондосбережения, в большинстве случаев не представляется возможным по целой совокупности причин. Это предопределило факт того, что в большинстве исследований в различных областях техники, в том числе и металлургической [2–5], оценивают (оптимизируют) исследуемый объект отдельно по каждому изученному параметру, что затрудняет, а в некоторых случаях делает невозможным, обобщенную оценку, а также сравнение преимуществ и недостатков различных способов повышения качества продукции.

Конечно, количество и качество взаимосвязаны между собой и составляют единство. Качество продукции диалектическим образом связано с количеством заложенного в ней необходимого труда. Но мера этого единства может быть различна в различных условиях. Так, тех-

нический прогресс, более высокий уровень организации производства, повышение производительности труда ведут к снижению необходимых затрат на производство ранее выпускавшихся изделий даже с учётом новых средств и ресурсов, потребовавшихся для создания более производительных машин разработки новых технологий. Производство опытных экземпляров новой продукции стоит дороже, а хорошо налаженное серийное производство той же продукции – значительно дешевле. Моральное старение продукции, снижение спроса на неё ведет к относительному падению качества, хотя стоимость единицы продукции может остаться прежней.

Очевидно, стоимость продукции также не может служить основным критерием качества. Поэтому в настоящее время вырабатываются и получают все более широкое признание более надежные, интегральные критерии:

- отношение полезного эффекта продукции к суммарным затратам на ее создание и изготовление [6];

- обобщенная функция желательности Харрингтона, в основе построения которой лежит идея преобразования натуральных частных показателей в безразмерную шкалу желательности [7].

Применительно к процессуковки крупногабаритных валов, к качеству которых предъявляются все более высокие требования, проблема повышения их качества, а также и конкурентоспособности, решается двояко:

- путём совершенствования формы исходного слитка;

- за счет применения различных технологических приемов, в основе которых лежат такие ресурсы физико-механического воздействия как термозональный фактор или деформационный эффект бойков с рабочими поверхностями, обеспечивающий интенсификацию сдвиговых деформаций [8–10].

При этом первый подход органично вписывается в группу элементов контура качества [11] «men», «material», «machine», которые целенаправлены, в большей степени, на краевые условия производственного процесса, а второй – элемент качества «method» – направленный, в первую очередь, на производство.

Вместе с тем, попыток оценить интегральное качество крупногабаритных валов, а значит и эффективность реализации вышеназванных подходов к его управлению, с обеспечением, по меньшей мере, экономически целесообразного эффекта за счет материало-, трудо-, энерго- и фондосбережения с помощью обобщающих критериев в литературе не выявлено.

Целью работы является исследование особенностей применения кузнечных слитков с трёхлучевым поперечным сечением на потенциальные возможности получения высококачественных крупногабаритных валов на основе использования интегрального показателя – обобщенной функции желательности Харрингтона.

В части результатов идентификации качества крупногабаритных валов при заключении контрактов на их поставку на экспорт соответствующими методиками ASTM или DIN устанавливаются следующие информативные показатели:

- σ_b (МПа) – предел прочности (временное сопротивление);

- $\sigma_{0,2}$ (МПа) – условный предел текучести;

- δ_5 (%) – относительное остаточное удлинение образца при растяжении;

- ψ (%) – относительное остаточное сужение площади поперечного сечения образца при растяжении;

- KCU (Дж/м²) – ударная вязкость по результатам образцов с концентратором вида U при комнатной температуре;

- C/c – параметр размеров допускаемых внутренних несплошностей при их неразрушающем ультразвуковом контроле ($2 \text{ мм} < d_{\text{экв}} < 3 \text{ мм}$, где $d_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр внутренних несплошностей).

При этом величина допускаемых отклонений данных информативных показателей регламентируется на уровне 5% для σ_b и $\sigma_{0,2}$, 30% для δ_5 и KCU , 25% для ψ . Для параметра C/c размеров допускаемых внутренних несплошностей при их неразрушающем ультразвуковом контроле допускаемых отклонений не предусматривается. Однако по согласованию сторон

регламентируется ограниченная поставка на экспорт валов с внутренними несплошностями с параметром В/в – ($3 \text{ мм} < d_{\text{экр}} < 5 \text{ мм}$).

В свете такой системы идентификации качества крупногабаритных валов, в рамках промышленного и полупромышленных исследований, с помощью интегрального показателя, а именно обобщенной функции желательности Харрингтона D , выполнена оценка последнего по результатам механических испытаний и неразрушающего ультразвукового контроля при изготовлении из восьмигранных и трехлучевых кузнечных слитков массой 8 т (табл. 1). Переход от приведенных к среднеарифметическим значениям результатов испытаний образцов на растяжение и неразрушающего ультразвукового контроля поковок валов в частные функции желательности d_i , $i = 1-6$ осуществляли по S-образной кривой функции желательности [1].

Поскольку принято считать, что значения функции желательности от 0,63 до 0,8 соответствуют «хорошему» и от 0,8 до 1 – «очень хорошему» уровню свойств [7], то полученные значения критерия Харрингтона D свидетельствуют о том, что использование трехлучевого кузнечного слитка позволяет обеспечивать выпуск конкурентоспособной продукции более высокого уровня качества. Данный вывод базируется на том, что при использовании восьмигранного кузнечного слитка во всех изученных случаях достигается комплекс свойств крупногабаритных валов в срединном районе диапазона «хорошего» уровня свойств, тогда как при использовании трехлучевого кузнечного слитка – в примыкающем к району «очень хорошего» уровня свойств. Об этом наглядно свидетельствует гектограмма, отражающая степень приближения достигаемого комплекса свойств крупногабаритных валов диаметром 410 мм к регламентируемым показателям (рис. 1).

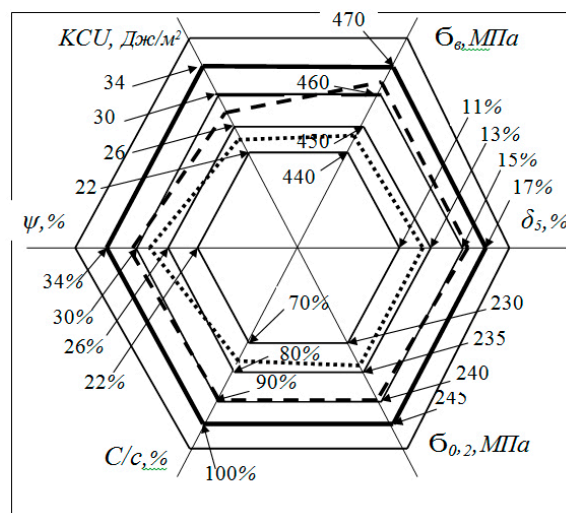


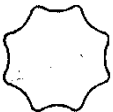

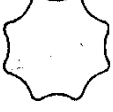

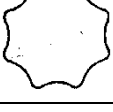

Рис. 1. Гектограмма комплекса свойств поковок крупногабаритных валов из углеродистой качественной стали 45 в состоянии поставки после нормализации:

— — — — — регламентируемый потребителям уровень показателей; — — — — — достигаемый уровень показателей при использовании восьмигранного и трехлучевого слитков

Наблюдаемая разница при использовании восьмигранного и трехлучевого слитков в обеспечиваемом комплексе уровня свойств крупногабаритных валов во всех изученных случаях достигает величины 10%, которая способствует удовлетворению потребностей более широкого круга потребителей данной продукции, особенно для сортамента крупногабаритных валов диаметром свыше 450 мм. Вместе с тем, обеспечение выпуска продукции более высокого уровня качества влечет за собой не только повышение конкурентоспособности предприятия-изготовителя, но и рост степени ресурсосбережения используемых при этом технологических процессов: в случае использования трехлучевых слитков без ущерба для качества поковок имеет место уменьшение величины головной обрези в интервале от 3% до 5%.

Таблица 1

Значения механических свойств поковок валов (изделий), частных функций желательности d_i , $i = 1-6$, параметра C/s размеров допускаемых внутренних несплошностей при их ультразвуковом контроле и критерия Харрингтона D

Вид и материал изделия	Поперечное сечение заготовки	Диаметр изделия, мм	Механические свойства изделия / значения частных функций желательности d_i , $i = 1-5$					Параметр C/s и значение d_6	D – критерий Харрингтона
			σ_b / d_1	$\sigma_{0,2} / d_2$	δ_5 / d_3	ψ / d_4	KCU / d_5		
Поковка вала, сталь 45		410	447,5/0,80	234,0/0,79	12,5/0,65	28,5/0,72	24,2/0,68	77,5/0,78	0,73
		500	445,3/0,78	232,5/0,77	12,0/0,64	27,3/0,70	23,6/0,65	74,1/0,75	0,71
Поковка вала, сталь 45		410	464,9/0,85	239,8/0,84	15,3/0,71	31,4/0,76	27,5/0,74	89,7/0,85	0,79
		500	462,7/0,83	237,9/0,82	14,7/0,70	29,5/0,74	26,8/0,72	87,5/0,83	0,77
Поковка вала, сталь 35		410	372,4/0,78	185,9/0,76	15,6/0,68	29,7/0,64	34,1/0,63	78,1/0,76	0,71
		500	369,7/0,76	183,3/0,74	13,8/0,65	28,1/0,63	31,9/0,60	75,6/0,73	0,68
Поковка вала, сталь 35		410	379,3/0,83	194,7/0,82	17,5/0,71	42,2/0,76	39,6/0,74	88,4/0,84	0,78
		500	377,5/0,81	191,6/0,80	16,9/0,70	40,8/0,74	37,7/0,72	87,1/0,82	0,76
Поковка вала, сталь 20		410	334,5/0,77	167,4/0,79	17,1/0,67	37,2/0,71	41,8/0,64	80,5/0,77	0,72
		500	330,7/0,75	164,9/0,76	15,8/0,64	33,6/0,68	37,2/0,62	78,6/0,74	0,70
Поковка вала, сталь 20		410	342,6/0,83	170,2/0,83	21,1/0,71	44,7/0,76	49,3/0,74	90,5/0,85	0,78
		500	340,3/0,81	168,8/0,81	20,3/0,70	42,9/0,74	46,8/0,71	88,3/0,83	0,77

Положительному результату в обеспечении комплекса более высокого уровня качества крупногабаритных валов при использовании трехлучевых слитков, несомненно, способствует интенсификация сдвиговых деформаций в их осевой зоне [12], где по результатам неразрушающего ультразвукового контроля поковок в большинстве случаев наблюдаются внутренние дефекты в виде несплошностей. При пластическом формоизменении восьмигранных слитков в их осевой зоне сдвиговые деформации равны нулю, тогда как при использовании трехлучевых слитков их осевая зона подвергается сдвиговому воздействию, в том числе для последовательности кантовок на 120° . Потенциальный деформационный эффект от интенсификации сдвиговых деформаций, величина которых значительно меньше по сравнению с нормальными компонентами тензора деформаций, в разы больше деформационного влияния последних, о чем упоминается в работе [13]. Вместе с тем, недооценка влияния нормальных компонент тензора скоростей деформаций (мгновенных деформаций, рис. 2), квадраты разностей которых наряду с квадратами сдвиговых компонент тензора деформаций входят в показатель интенсивности скоростей деформаций сдвига [14], в комплексном механизме залечивания (заварки) внутренних дефектов в виде несплошностей (пустот, пор) не совсем оправдана.

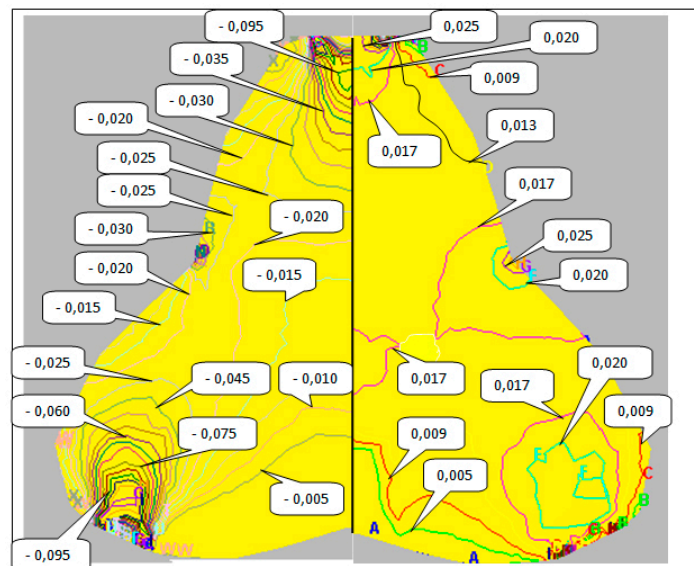


Рис. 2. Изолинии мгновенных нормальных деформаций в направлении обжатия ξ_{22} (слева) и в направлении вытяжки ξ_{11} (справа) в поперечном сечении моделей, подвергнутых обжатию $\varepsilon = 11\%$

Подтверждением этому являются результаты исследований процессовковки и прокатки, выполненные на физических моделях с предварительно расположенными в их объеме цилиндрическими пустотами [15], а также теоретического моделирования с использованием метода конечных элементов [16]. В комплексном механизме залечивания (заварки) внутренних дефектов следует руководствоваться влиянием эффективной схемы деформации на процесс замыкания несплошностей и их залечивания (заварки) в противоположность деструктивным схемам деформации, вызывающим противоположный эффект, наличие которых отмечено в работе [17].

ВЫВОДЫ

При разработке ресурсосберегающих технологий добиться одновременной максимально возможной оптимизации всех компонентов для проектируемых (подвергаемых совершенствованию) технологических процессов не представляется возможным. Одним из подходов достижения, по меньшей мере, экономически целесообразного эффекта, является использова-

ние интегральных показателей, и в частности – обобщенной функции желательности Харрингтона. Показано, что использование трехлучевого кузнечного слитка, по сравнению с восьмигранным, позволяет организовать выпуск крупногабаритных валов из качественной углеродистой стали марки Ст45 более высокого уровня качества за счет интенсификации сдвиговых деформаций в их осевой зоне, а также снизить материалоемкость их производства от 3% до 5% за счет уменьшения величины головной обрезки. Дополнительный положительный результат может быть достигнут также за счет уплотнения и заварки имеющихся в осевой зоне кузнечных слитков несплошностей (пустот, пор).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Негодаев И. А. *Философия техники [Текст] / И. А. Негодаев. – Ростов-на-Дону : Центр ДГТУ, 1997. – 562 с.*
2. Алимов В. И. *К вопросу оценки качества проволочной заготовки с помощью функции желательности / В. И. Алимов, О. В. Пушкина // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія Металургія. – Донецьк, 2012. – Вип. 1(14)–2(15). – С. 157–163.*
3. Samuel E. I. *Accelerated spheroidisation induced by high intensity electric pulse in a severely deformed eutectoid steel / E. I. Samuel, A. Bhowmik, R. S. Qin // Journal of Materials Research. – 2010. – Vol. 25. – № 6. – P. 1020–1024.*
4. Qin R. S. *Electropulse-induced cementite nanoparticle formation in deformed pearlitic steels / R. S. Qin, E. I. Samuel, A. Bhowmik // Journal of Materials Science. – 2011. – № 46. – P. 2838–2842.*
5. Teruyuki M. *Direct Heat Treatment Technique for High-Strength, Large-Diameter PC Steel Bars with Pearlite Microstructure / M. Teruyuki // Sei Technical Review. – 2011. – № 73. – P. 31–34.*
6. Лапуста М. Т. *Стимулирование повышения качества продукции / М. Т. Лапуста, Д. П. Никитин. – М. : Экономика, 1980. – 25 с.*
7. Секерин В. Д. *Выбор материала с помощью функции желательности Харрингтона: методические указания / В. Д. Секерин, В. Н. Ясонов, Д. В. Секерин. – М. : МГУИЭ, 2009. – 21 с.*
8. Тюрин В. А. *Инновационные технологииковки валов с применением макросдвигов / В. А. Тюрин // Кузнечно-штамповочное производство. – 2007. – № 11. – С. 15–20.*
9. Биба Н. В. *QForm – универсальная и эффективная программа для моделированияковки и штамповки / Н. В. Биба, С. А. Стебунов, Ю. А. Гладков // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2011. – № 1. – С. 36–42.*
10. *Основания необходимости учета несовершенств кузнечного слитка при проектировании процессаковки на прессах / В. А. Белевитин [и др.] // Обработка материалов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 4 (33). – С. 81–85.*
11. Штеффес Б. *Обеспечение качества при производстве длинномерной продукции из специальных сталей / Б. Штеффес, Ф. Треппиц // Чёрные металлы. – 1999. – С. 26–30.*
12. *Инновационные подходы в моделировании неоднородностей материала кузнечных слитков / В. А. Белевитин, С. Ю. Коваленко, А. В. Суворов, Е. Н. Смирнов // Наука и технологии. – Избранные труды Всероссийской конференции по проблемам науки и технологий. – М. : РАН, 2015. – С. 144–166.*
13. Тюрин В. А. *Технология и процессыковки на прессах / В. А. Тюрин. – М. : Машиностроение, 1979. – 240 с.*
14. *Экспериментальные методы механики деформируемых твердых тел (технологические задачи обработки давлением) / В. К. Воронцов, П. И. Полухин, В. А. Белевитин, В. В. Бринза. – М. : Металлургия, 1990. – 480 с., ил.*
15. Park J. J. *Prediction of void closure in slab during various processes / J. J. Park // J. of Mechanical Science and Technology – 2011. – № 25 (11). – P. 2871–2876.*
16. Banaszek G. *Theoretical and laboratory modeling of the closure of metallurgical defects during forming of a forging / G. Banaszek, A. Stefanik // J. Mater. Process. Technology. – 2006. – № 177. – P. 238–242.*
17. Дзугутов М. Я. *Напряжения и разрывы при обработке металлов давлением [Текст]: учебное пособие / М. Я. Дзугутов. – М. : Металлургия, 1994. – 288 с.*

REFERENCES

1. Negodaev I. A. *Filosofija tehniki [Tekst] / I. A. Negodaev. – Rostov-na-Donu : Centr DGTU, 1997. – 562 s.*
2. Alimov V. I. *K voprosu ocenki kachestva provolochnoj zagotovki s pomoshh'ju funkcii zhelatel'nosti / V. I. Alimov, O. V. Pushkina // Naukovi praci Donec'kogo nacional'nogo tehnicnogo universitetu. Serija Metalurgija. – Donec'k, 2012. – Vip. 1(14)–2(15). – S. 157–163.*
3. Samuel E. I. *Accelerated spheroidisation induced by high intensity electric pulse in a severely deformed eutectoid steel / E. I. Samuel, A. Bhowmik, R. S. Qin // Journal of Materials Research. – 2010. – Vol. 25. – № 6. – P. 1020–1024.*
4. Qin R. S. *Electropulse-induced cementite nanoparticle formation in deformed pearlitic steels / R. S. Qin, E. I. Samuel, A. Bhowmik // Journal of Materials Science. – 2011. – № 46. – P. 2838–2842.*

5. Teruyuki M. *Direct Heat Treatment Technique for High-Strength, Large-Diameter PC Steel Bars with Pearlite Microstructure* / M. Teruyuki // *Sei Technical Review*. – 2011. – № 73. – P. 31–34.
6. Lapusta M. T. *Stimulirovanie povysheniya kachestva produkcii* / M. T. Lapusta, D. P. Nikitin. – M. : *Jekonomika*, 1980. – 25 s.
7. Sekerin V. D. *Vybor materiala s pomoshh'ju funkcii zhelatel'nosti Harringtona: metodicheskie ukazaniya* / V. D. Sekerin, V. N. Jasonov, D. V. Sekerin. – M. : MGUIJe, 2009. – 21 s.
8. Tjurin V. A. *Innovacionnye tehnologii kovki valov s primeneniem makrosdvigov* / V. A. Tjurin // *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*. – 2007. – № 11. – S. 15–20.
9. Biba N. V. *QForm – universal'naja i jeffektivnaja programma dlja modelirovaniya kovki i shtampovki* / N. V. Biba, S. A. Stebunov, Ju. A. Gladkov // *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. – 2011. – № 1. – S. 36–42.
10. *Osnovaniya neobходимosti ucheta nesovershenstv kuznechnogo slitka pri proektirovanii processa kovki na pressah* / V. A. Belevitin [i dr.] // *Obrabotka materialov davleniem : sbornik nauchnyh trudov*. – Kramatorsk : DGMA, 2012. – № 4 (33). – S. 81–85.
11. Shteffes B. *Obespechenie kachestva pri proizvodstve dlinnomernoj produkcii iz special'nyh stalej* / B. Shteffes, F. Treppshu // *Chjornye metally*. – 1999. – S. 26–30.
12. *Innovacionnye podhody v modelirovanii neodnorodnostej materiala kuznechnykh slitkov* / V. A. Belevitin, S. Ju. Kovalenko, A. V. Suvorov, E. N. Smirnov // *Nauka i tehnologii*. – *Izbrannye trudy Vserossijskoj konferencii po problemam nauki i tehnologii*. – M. : RAN, 2015. – S. 144–166.
13. Tjurin V. A. *Tehnologija i processy kovki na pressah* / V. A. Tjurin. – M. : *Mashinostroenie*, 1979. – 240 s.
14. *Jeksperimental'nye metody mehaniki deformiruemyh tverdych tel (tehnologicheskie zadachi obrabotki davleniem)* / V. K. Voroncov, P. I. Poluhin, V. A. Belevitin, V. V. Brinza. – M. : *Metallurgija*, 1990. – 480 s., il.
15. Park J. J. *Prediction of void closure in slab during various processes* / J. J. Park // *J. of Mechanical Science and Technology* – 2011. – № 25 (11). – P. 2871–2876.
16. Banaszek G. *Theoretical and laboratory modeling of the closure of metallurgical defects during forming of a forging* / G. Banaszek, A. Stefanik // *J. Mater. Process. Technology*. – 2006. – № 177. – P. 238–242.
17. Dzugutov M. Ja. *Naprzazheniya i razryvy pri obrabotke metallov davleniem [Tekst]: uchebnoe posobie* / M. Ja. Dzugutov. – M. : *Metallurgija*, 1994. – 288 s.

Белевитин В. А. – д-р техн. наук, проф., зам. директора по качеству ОАО «Уфалейский завод металлических изделий»;

Смирнов Е. Н. – д-р техн. наук, проф. СТИ НИТУ МИСиС;

Коваленко С. Ю. – аспирант ФГАОУ ВПО «ЧГПУ»;

Суворов А. В. – аспирант ФГАОУ ВПО «ЧГПУ».

СТИ НИТУ МИСиС – Старооскольский технологический институт им. А. А. Угарова (филиал) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Старый Оскол (Россия);

ФГАОУ ВПО «ЧГПУ» – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Челябинский государственный педагогический университет», г. Челябинск (Россия).

E-mail: en_smirnov@i.ua