

УДК 621.77:669.14.018.27

ПОЛУЧЕНИЕ КАЧЕСТВЕННОГО КАЛИБРОВАННОГО ПРОКАТА ДЛЯ ВЫСАДКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ БОЛТОВ

Филиппов А.А., Пачурин В.Г., Пачурин Г.В.

*ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, e-mail: PachurinGV@mail.ru*

Основной причиной образования дефектов на стержневых болтовых изделиях является технологическая переработка проката по всей технологической цепочке, поэтому развитие массового производства упрочнённого крепежа предполагает устранение причин возникновения дефектов от получения проката до изготовления метизов требуемого качества. Переработка горячекатаного проката с металлургическими дефектами увеличивает количество бракованных крепежных изделий и приводит к повышенному расходу металла, а, следовательно, к повышению затрат на изготовление готовой продукции. Одной из важнейших характеристик структурно-энергетического состояния калиброванного проката является удельная энергия, затраченная на его деформацию до момента разрушения. В работе получены значения стандартных механических характеристик (прочностных и пластических) и критериев разрушения калиброванного проката стали 40X после его изотермической обработки с различными температурами селитровой ванны и волочения с различными степенями деформации. Найдены величины критериев работоспособности, дополняющие стандартные механические характеристики калиброванного проката в оценках работоспособности и трещиностойкости стальных материалов после различных видов и режимов технологической обработки.

Ключевые слова: горячекатаный прокат, изотермическая обработка, волочение, степень обжатия, структура, механические свойства, критерии работоспособности, трещиностойкость

PRODUCING HIGH-QUALITY CALIBRATED ROLLED LANDING HIGH STRENGTH BOLTS

Filippov A.A., Pachurin V.G., Pachurin G.V.

*FGBOU VPO «Nizhny Novgorod State Technical University. R.E. Alekseev»,
Nizhny Novgorod, e-mail: PachurinGV@mail.ru*

The main reason for the formation of defects in the rod bolt products is the technological processing of rolled the entire process chain, so the development of mass production hardened fasteners involves the removal of the causes of defects from getting rolled up to the manufacture of metal products of the required quality. Processing hot rolled metallurgical defects increases with the number of defective fasteners and leads to an increased metal consumption, and hence to improve the production costs of the finished products. One of the most important characteristics of structural and energetic state of the calibrated hire a specific energy expended in its deformation prior to fracture. In this paper, the values of standard mechanical properties (strength and ductility) and fracture criteria sized rolled steel 40X after isothermal treatment at different temperatures salt peter bath and drawing with varying degrees of deformation. Found values of criteria of efficiency, complementing the standard mechanical characteristics of the calibrated hire in health evaluation and fracture toughness of steel materials after different types and modes of processing.

Keywords: hot-rolled steel, isothermal processing, drawing, reduction ratio, structure, mechanical properties, performance criteria, fracture toughness

Развитие массового производства упрочнённого крепежа предполагает снижение затрат от получения проката до изготовления метизов требуемого качества [8, 9]. Поверхностные дефекты проката, предназначенного для изготовления болтов методом холодной объемной штамповки (ХОШ), увеличивают экономические потери на предприятии. Риски, закаты, волосяны, царапины являются опасными при производстве крепежа. Переработка горячекатаного проката с металлургическими дефектами увеличивает количество бракованных крепежных изделий и приводит к повышенному расходу металла [6, 10]. Основной причиной образования дефектов на стержневых болтовых изделиях является технологическая переработка проката по

всей технологической цепочке. Необходимо использовать для производства крепежных изделий прокат, который способен выдерживать деформации до 75% без разрушения его поверхности и тела.

60% крепежа класса прочности 9.8, 10.9 и выше изготавливают из проката стали 40X [5, 8], так как она обладает относительно низкой стоимостью и имеет традиционно наибольшее распространение для упрочняемых крепежных изделий любой степени массовости [4]. Основным способом получения высокопрочных болтов является высадка из калиброванного проката, имеющего микроструктуру «зернистый перлит». Затем болты подвергают закалке и отпуску. Закалка стержневых изделий может способствовать образованию микротрещин

и обезуглероженного слоя. Если вопрос подготовки проката для холодной высадки с микроструктурой 80–100% зернистого перлита изучен достаточно глубоко, то использованию проката, имеющего в структуре стали сорбит патентирования, из-за роста сопротивления пластической деформации уделяется недостаточное внимание.

Качество проката в разных структурных состояниях оценивается с помощью стандартных характеристик прочности и пластичности: предела прочности σ_b и предела текучести σ_r , относительного сужения ψ и относительного удлинения δ , степени деформации при осадке, характера и глубины поверхностных дефектов. Однако значения этих характеристик в ГОСТах и ТУ приводятся только для одного состояния материала, и это не всегда достаточно для оценки его возможностей при других комбинациях структур, схемах деформации и напряжений, которые вместе взятые влияют на его напряженное состояние, определяющее ресурс пластичности калиброванного проката. Таким образом, стандартных механических характеристик проката недостаточно для оценки возможностей стали к холодному деформированию [1].

По мнению [2] повышение выхода бездефектных крепежных изделий, получаемых из калиброванного проката, и обеспечение заданной долговечности работы крепежа зависит от наличия поверхностных дефектов, роль которых в разрушении материалов, находящихся в различном структурном состоянии, еще не получила должной оценки. В своих работах автор проанализировал все существующие поверхностные дефекты, исследовал их проявление, выявил безопасные размеры поверхностных дефектов при их производстве без снижения требований к эксплуатационным характеристикам.

Риски, закаты, волосовины, царапины на калиброванном прокате являются наиболее опасными, так как в технологических процессах схема главных деформаций и напряжений способствует раскрытию поверхностных дефектов. Поперечные дефекты (следы проточки, кольцевые риски и т.п.) на калиброванном прокате для объемного пластического деформирования менее опасны. Однако при снятии недопустимых дефектов на поверхности проката путем операции обточки возникают и другие нежелательные дефекты поверхности. Так, например, при проточке поверхности проката возникают высокие температуры и упрочнение в тонком поверхностном слое с образованием трещин в нем.

Наличие поверхностного дефекта на прокате приводит к значительной концен-

трации напряжений. В работе [2] рассчитаны значения технического коэффициента концентрации напряжений K^* от поверхностных дефектов для различного проката многих марок сталей. Данная методика оценки пригодности материалов для холодного пластического деформирования дает возможность объективно оценить их уровень для изготовления бездефектной продукции с учетом схемы деформированного и напряженного состояния, оценить ресурс пластичности материала.

Авторы работы [3] считают, что определять значение предельной пластичности необходимо с помощью диаграмм предельной пластичности. При этом каждый материал независимо от состояния имеет свою зависимость предельной пластичности от показателя напряженного состояния.

В последние годы среди исследователей, занимающихся вопросами разрушения металлов, усилился интерес к энергетическим критериям разрушения. В работе [7] анализируется развитая концепция предельной удельной энергии деформации (энергоемкости), величина которой наряду с критическим коэффициентом интенсивности напряжений в вершине трещины является фундаментальной характеристикой сопротивления металла разрушению. В работе [7] представлены зависимости предельной удельной энергии деформации W_c от пропорционального твердости показателя структурно-энергетического состояния Псэс для сталей десяти структурных классов.

Критерии синергетики более объективны, а поэтому необходимы для практики при оценке работоспособности и надежности калиброванного проката при изготовлении болтовых изделий. Они дополняют в оценках работоспособности и трещиностойкости данного проката его стандартные механические характеристики. Кроме того, они не трудоемки в расчетах.

В работе исследована возможность оценки работоспособности проката из стали 40X, используемого для производства длинномерных болтов, после различных режимов технологической подготовки.

Методика механических испытаний

Для исследования была выбран горячекатаный прокат стали 40X диаметром 11,0 и 13,0 мм. Образцы каждой марки сталей для механических испытаний маркиварительно:

– протачивались с диаметра 13,0 мм на диаметры 8,25; 8,50; 9,00; 9,60; 10,40; 11,40 и 12,70 мм, после чего их волочили на диаметр 8,00 мм соответственно со степенями обжатия 5, 10, 20, 30, 40 и 60%, затем про-

водилась изотермическая обработка при температуре 370, 400, 425, 450, 500 и 550 °С;

– протачивались с диаметра 13,0 мм на диаметры 8,25; 8,50; 9,00; 9,60; 10,40; 11,40 и 12,70 мм, затем проводилась изотермическая обработка при температурах 370, 400, 425, 450, 500 и 550 °С, после чего образцы подвергали волочению, каждый на диаметр 8,00 мм соответственно со степенями обжатия 5, 10, 20, 30, 40 и 60 %;

– отжигались на микроструктуру «зернистый перлит» в камерной печи с выдвижным подом;

– очищалась поверхность от окалины в маточном растворе серной кислоты в соотношении: H_2SO_4 – 25 %, остальное – железный купорос ($Fe_2SO_4 \cdot H_2$), и промывали в проточной воде;

– волочили с диаметров 8,25; 8,50; 9,00; 9,60; 10,40; 11,40 и 12,70 мм на диаметр 8,00 мм на однократном волочильном стане ВС/1-750 соответственно со степенями обжатия 5, 10, 20, 30, 40 и 60 %. В качестве технологической смазки использовалась мыльная стружка.

Степень обжатия при волочении проката q (%) определялась:

$$q = \frac{100 \cdot (d_0^2 - d_1^2)}{(d_0)^2}, \quad (1)$$

где d_0 – диаметр образца проката до волочения, мм; d_1 – диаметр образца проката после волочения, мм.

Половина образцов проката после волочения подвергалась изотермической обработке, другая половина образцов после изотермической обработки подвергалась волочению. Для обеспечения гомогенности аустенита температура нагрева перед изотермической обработкой принималась 880 °С. Образцы проката подвергались нагреву в соляной ванне (78 % $BaCl + 22$ % $NaCl$) в течение 5 минут. Затем образцы переносились в селитровую ванну (50 % $NaNO_3 + 50$ % KNO_3) и осуществлялась операция патентирования при температурах 370, 400, 425, 450, 500 и 550 °С с выдержкой пять минут. Далее охлаждение образцов проводилось на воздухе в течение двух минут, затем они охлаждались в воде. Точность регулирования температуры в ванне при патентировании составляла ± 5 °С. Последующую подготовку поверхности (снятие окисного слоя) изотермически обработанного проката производили в маточном растворе серной кислоты (H_2SO_4 – 25 %, остальное – железный купорос – Fe_2SO_4). Затем прокат промывался в проточной воде.

Химический состав стали 40X определялся с использованием спектроанализа-

тора «Belec-kompakt Lab». Прочностные и пластические характеристики горячекатаного проката в исходном состоянии и калиброванного проката после всех видов технологической переработки определялись при испытании на растяжение образцов длиной 300 мм на разрывной машине типа ЦДМ – 100 со шкалой 20 кг. Микроструктура исследовалась на МИМ – 8 ($\times 200$ и $\times 600$) и «Неофот-21» ($\times 100$ и $\times 600$). Твердость измеряли на приборе «Роквелл», шкала В и С.

Натурные испытания длинномерных болтов с определением величины разрывной нагрузки и относительного удлинения производили на разрывной машине МУП-50. Фрактографические исследования излома болтов изучали на оптическом компараторе МИР-12 ($\times 7$).

Методика расчета структурно-энергетических комплексов разрушения синергетики

Одной из важнейших характеристик структурно-энергетического состояния калиброванного проката является [7] удельная энергия (работа), затраченная на его деформацию до момента разрушения W_c (предельная удельная энергия деформации). Поведение любых структур при нагрузке контролируется тремя взаимосвязанными величинами: пределом текучести (σ_m), объемной плотностью удельной энергии деформации (W_c) и предельной удельной энергией деформации в зоне перед трещиной ($W_{c,кр}$). W_c является показателем энергоемкости металла (размерность МДж/м³) и определяется по формуле:

$$W_c = 0,5 \cdot (\sigma_m + \sigma_k) \cdot \varepsilon_{пред}, \quad (2)$$

где σ_m – предел текучести; $\sigma_k = \sigma_b (1 + \delta)$ – истинное сопротивление разрушению, МПа; $\varepsilon_{пред} = \ln [1/(1 - \psi)]$ – истинная относительная деформация при разрушении; W_c – показатель энергоемкости металла, размерность [МДж/м³].

В формулу входят прочностные и пластические характеристики. В данном случае поведение прочностных и пластических свойств проката зависит от параметров микроструктуры, которая в свою очередь зависит от химического состава, режимов термической и пластической обработок. Исходные данные задавались на основании характеристик, полученных при испытаниях образцов калиброванного проката при различных режимах изотермической обработки и последующей пластической обработки с различными степенями обжатия методом волочения.

Зарождению трещины в калиброванном прокате предшествует пластическая деформация. Критерий зарождения трещины $K_{3т}$,

количественно определяющий способность проката сопротивляться возникновению трещин при деформации, определяется выражением [7]

$$K_{зт} = W/\sigma_{т} \quad (3)$$

где $K_{зт}$ – величина безразмерная. Чем выше значение $K_{зт}$, тем труднее зарождаются трещины в калиброванном прокате стали 40X в процессе холодной деформации волочением.

Критерий распространения трещины $K_{рт}$ количественно определяет способность материала сопротивляться развитию трещин при волочении проката в условиях достижения критического напряженного состояния и равен

$$K_{рт} = W_{с крит} \cdot \sigma_{т} \quad (4)$$

где $W_{с крит}$ – критическая величина предельной удельной энергии деформации перед вершиной трещины, определяется при критическом напряженном состоянии, ког-

да энергия деформации, затрачиваемая на пластическую деформацию, равна энергии, идущей на упругое искажение объема. Величина $W_{с крит} \approx (0,75-0,5) \cdot W_{с}$. $K_{рт}$ имеет размерность [(МДж/м³)МПа \approx (МДж/м³)²].

Результаты исследования и их обсуждение

В работе получены значения стандартных механических характеристик (прочностных и пластических) и критериев разрушения калиброванного проката стали 40X после его изотермической обработки с различными температурами селитровой ванны и последующего волочения с различными степенями деформации. В табл. 1–4 представлены механические характеристики и критерии разрушения синергетики ($W_{с}$, $K_{зт}$, $K_{рт}$) проката 40X после патентирования при 370, 400, 450, 500 и 550 °С и последующего волочения с различными степенями деформации.

Таблица 1
Механические характеристики и критерии разрушения синергетики калиброванного проката 40X после патентирования при 370 °С и последующего волочения с разными степенями обжатия

Степень обжатия, %	НВ	$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{т}$, МПа	Ψ , %	δ , %	W , МДж/м ³	$K_{зт}$	$K_{рт}$, (МДж/м ³)МПа·10 ⁻⁶
5	306	1097	970	47	10,8	635	0,6	0,37
10	306	1098	965	47	11	692	0,71	0,40
20	316	1160	985	45	9,8	674	0,68	0,39
30	298	1320	1190	20	6,9	290	0,24	0,21
40	306	1340	1180	17	5,2	235	0,2	0,17
60	330	1360	1190	17	5,2	238	0,2	0,17

Таблица 2
Механические характеристики и критерии разрушения калиброванного проката 40X после патентирования при 400 °С и последующего волочения с разными степенями обжатия

Степень обжатия, %	НВ	$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{т}$, МПа	Ψ , %	δ , %	W , МДж/м ³	$K_{зт}$	$K_{рт}$, (МДж/м ³) МПа·10 ⁻⁶
5	285	950	840	57	13	886	1,05	0,46
10	280	995	910	56	12,5	857	0,94	0,46
20	315	1110	970	55	11,5	881	0,91	0,51
30	283	1270	1110	45	9,5	702	0,63	0,46
40	302	1250	1070	40,9	7,8	635	0,59	0,41
60	318	1290	1240	22,1	6,9	326	0,26	0,24

Таблица 3
Механические характеристики и критерии разрушения калиброванного проката 40X после патентирования при 450°C и последующего волочения с разными степенями обжатия

Степень обжатия, %	НВ	σ_b , МПа	σ_r , МПа	Ψ , %	δ , %	W , МДж/м ³	$K_{ст}$	$K_{рт}$ (МДж/м ³)МПа·10 ⁻⁶
5	260	973	910	49,2	13	680	0,75	0,37
10	235	1010	940	53	12,5	783	0,83	0,44
20	255	1075	940	50	11	785	0,83	0,44
30	313	1310	1200	32	5,2	483	0,40	0,34
40	298	1280	1130	30	4,4	441	0,39	0,30
60	–	–	–	–	–	–	–	–

Таблица 4
Механические характеристики и критерии калиброванного проката 40X после температуры патентирования при 500°C и последующего волочения с разными степенями обжатия

Степень обжатия, %	НВ	σ_b , МПа	σ_r , МПа	Ψ , %	δ , %	W , МДж/м ³	$K_{ст}$	$K_{рт}$ (МДж/м ³)МПа·10 ⁻⁶
5	298	1110	996	40	10,8	568	0,57	0,34
10	247	1055	990	40	8,9	546	0,55	0,32
20	247	1160	1050	29	8,35	394	0,38	0,25
30	–	–	–	–	–	–	–	–
40	–	–	–	–	–	–	–	–
60	–	–	–	–	–	–	–	–

Таблица 5
Механические характеристики и критерии разрушения калиброванного проката 40X, подготовленного по действующей технологии на производстве

НВ	σ_b , МПа	σ_r , МПа	Ψ , %	δ , %	W , МДж/м ³	$K_{ст}$	$K_{рт}$ (МДж/м ³)МПа·10 ⁻⁶
235	860	695	57	13	708	1,02	0,33

В табл. 5 показаны механические характеристики и критерии разрушения калиброванного проката 40X, подготовленного по действующей технологии на производстве.

Упрочнение волочением с разными степенями обжатия и изотермическая обработка при температурах селитровой ванны 370, 400, 425, 450, 500 и 550°C выявили различные варианты получения механических характеристик.

Наилучшее сочетание механических характеристик (высокая пластичность и незначительное сопротивление пластической деформации) достигается при обжатии 5%. С увеличением обжатия до 10% наблюдаются интенсивный рост предела текучести и резкое снижение относительного удлинения. При обжатии 15% значительно возрастает предел прочности, а относительное удлинение продолжает уменьшаться. Дальнейшее увеличение обжатия до 60% вызывает непрерывный рост предела текучести и предела прочности, относительное удлинение медленно снижается, а относитель-

ное сужение находится на высоком уровне (60–58%) до обжатия 25%, а после чего падает двумя ступенями в интервалах обжатия 25–35 и 40–60%.

Пластические характеристики проволоки со структурой зернистого перлита в процессе волочения непрерывно снижаются и при $\epsilon > 40\%$ становятся ниже пластических характеристик проволоки, которая подвергалась термической операции изотермической обработки.

При разработке ресурсосберегающего метода для изготовления высокопрочных автомобильных болтов производился эксперимент, при котором изучалось влияние степени обжатия (5, 10, 20, 30, 40, 60%) при волочении и последующего патентирования в интервале температур 370; 400; 425; 450; 500, 550°C на механические характеристики проката.

Было подтверждено, что с увеличением обжатия горячекатаного проката от 5 до 60% увеличиваются его прочностные характеристики. Предел текучести возрастает

с 780 до 990 МПа, а временное сопротивление разрыву – с 880 до 1130 МПа.

Также установлено, что с увеличением обжатия проката от 5 до 60% его пластические характеристики снижаются. Относительное удлинение при обжатиях волочением от 5 до 30% снижается с 15 до 10%, а при обжатиях от 30 до 60% остается постоянным и равным 10%. Относительное сужение при обжатиях от 5 до 60% монотонно снижается от 60 до 38%.

Получены критерии работоспособности, позволяющие количественно оценить влияние упрочнения при изотермической обработке и пластической деформации волочением на процесс разрушения, выраженное в синергетической величине энергоемкости. Они дополняют стандартные механические характеристики калиброванного проката в оценках работоспособности и трещиностойкости стальных материалов после различных видов и режимов технологической обработки.

Выводы

Получены механические характеристики горячекатаного проката при различных вариантах его подготовки (как степени деформации волочением после изотермической обработки при разных температурах, так и степени деформации волочением перед изотермической обработкой при разных температурах).

Выявлена зависимость прочностных и пластических характеристик от степени деформации при волочении проката до и после изотермической обработки при разных температурах.

Получены экспериментальные данные влияния температуры изотермической обработки (370, 400, 425, 450, 500 и 550°C) до и после волочения с разными степенями деформации на твердость и механические характеристики проката.

В производственных условиях недостаточно используются критерии разрушения сталей, которые позволяют реально количественно оценить обратное влияние процесса упрочнения проката на процесс разрушения металлических материалов.

Количественная оценка работоспособности по критериям синергетики показала новые качества стороны проката стали 40X, поскольку по механическим характеристикам такие оценки сделать было невозможно. При действующих и предлагаемых режимах обработок проката рассмотрены их работоспособность, рассчитаны критерии зарождения и распространения трещин.

Список литературы

1. Бунатян Г.В., Скуднов В.А. Прогрессивная технология производства инструмента // Кузнечно-штамповое производство. – 1985. – № 9. – С. 25–26.

2. Воробьев И.А. Прогнозирование качества изделий, изготовленных холодным пластическим деформированием // Кузнечно-штамповое производство. – 1985. – № 9. – С. 27–28.

3. Дорошев Ю.В., Воробьев И.А., Скуднов В.А. К вопросу о влиянии схемы напряженного состояния на предельную пластичность металлов, применяемых в холодновысадочном производстве. – Тр.НИИТавтопром. – 1972. – № 1(37). – С. 7–8.

4. Пачурин Г.В., Филиппов А.А. Экономичная технология подготовки стали 40X к холодной высадке крепежных изделий // Вестник машиностроения. – 2008. – № 7. – С. 53–56.

5. Пачурин Г.В., Филиппов А.А., Кузьмин Н.А. Влияние химического состава и структуры стали на качество проката для изготовления болтов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 8 (Часть 2). – С. 87–92.

6. Пачурин Г.В., Филиппов А.А., Кузьмин Н.А. Анализ качества проката для холодной высадки крепежных изделий // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 8 (Часть 2). – С. 111–115.

7. Скуднов В.А. Синергетика явлений и процессов в металловедении, упрочняющих технологиях и разрушении: учебное пособие для студентов вузов. – Нижний Новгород, 2007. – 191 с.

8. Филиппов А.А., Пачурин Г.В. Основные направления развития производства высокопрочного крепежа // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 8. (Ч. 4). – С. 30–36.

9. Филиппов А.А., Пачурин Г.В., Кузьмин Н.А. Упрочняющая обработка проката для крепежа с целью снижения его стоимости // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 8 (Часть 2). – С. 107–110.

10. Pachurin G.V., Filippov A.A. Economical preparation of 40X steel for cold upsetting of bolts // Russian Engineering Research. – 2008. – Т. 28. – № 7. – С. 670–673.

References

1. Bunatjan G.V., Skudnov V.A. Progressivnaja tehnologija proizvodstva instrumenta // Kuznechno-shtampovoe proizvodstvo. 1985. no. 9. pp. 25–26.

2. Vorobev I.A. Prognozirovanie kachestva izdelij, izgotovlennyh holodnym plasticheskim deformirovaniem // Kuznechno-shtampovoe proizvodstvo. 1985. no. 9. pp. 27–28.

3. Doroshev Ju.V., Vorobev I.A., Skudnov V.A. K voprosu o vlijanii shemy naprjazhennogo sostojanija na predel'nuju plastichnost' metallov, primenjaemyh v holodnovysadочном proizvodstve. Tr.NIITavtoprom. 1972. no. 1(37). pp. 7–8.

4. Pachurin G.V., Filippov A.A. Jekonomichnaja tehnologija podgotovki stali 40H k holodnoj vysadke krepznych izdelij // Vestnik mashinostroenija. 2008. no. 7. pp. 53–56.

5. Pachurin G.V., Filippov A.A., Kuz'min N.A. Vlijanie himicheskogo sostava i struktury stali na kachestvo prokata dlja izgotovlenija boltov // Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij. 2014. no. 8 (Chast' 2). pp. 87–92.

6. Pachurin G.V., Filippov A.A., Kuz'min N.A. Analiz kachestva prokata dlja holodnoj vysadki krepznych izdelij // Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij. 2014. no. 8 (Chast' 2). pp. 111–115.

7. Skudnov V.A. Sinergetika javlenij i processov v metallovedenii, uprochnjajushih tehnologijah i razrushenii: uchebnoe posobie dlja studentov vuzov. Nizhnij Novgorod, 2007. 191 p.

8. Filippov A.A., Pachurin G.V. Osnovnye napravlenija razvitija proizvodstva vysokoprochnogo krepzha // Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij. 2014. no. 8. (Ch. 4). pp. 30–36.

9. Filippov A.A., Pachurin G.V., Kuz'min N.A. Uprochnjajushhaja obrabotka prokata dlja krepzha s cel'ju snizhenija ego stoimosti // Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij. 2014. no. 8 (Chast' 2). pp. 107–110.

10. Pachurin G.V., Filippov A.A. Economical preparation of 40X steel for cold upsetting of bolts // Russian Engineering Research. 2008. T. 28. no. 7. pp. 670–673.