



**КОХАН**

**Лев Соломонович**  
(Московский  
государственный  
машиностроительный  
университет (МАМИ))

**KOKHAN**

**Lev Solomonovich**  
(Moscow, Russian Federation,  
Moscow State University  
of Mechanical Engineering  
(MAMI))



**ПУНИН**

**Владимир Иванович**  
(МГТУ им. Баумана)

**PUNIN**

**Vladimir Ivanovich**  
(Moscow, Russian Federation,  
Bauman Moscow State  
Technical University)



**РЕМПЕЛЬ**

**Георгий Борисович**  
(Московский  
государственный  
машиностроительный  
университет (МАМИ), ФГУП  
«НПЦ газотурбостроения  
«Салют»)

**REMPEL'**

**Georgiy Borisovich**  
(Moscow, Russian Federation,  
Moscow State University  
of Mechanical Engineering  
(MAMI), FSUE Gas Turbine  
SPC «Salut»)

## Исследование плотности материалов после вальцовки

**Л.С. Кохан, В.И. Пунин, Г.Б. Ремпель**

*К ответственным деталям для авиационного моторостроения предъявляются крайне высокие требования. Общая прочность этих деталей и, особенно, распределение прочности по их сечению должны соответствовать жестким стандартам. Кроме того, в условиях растущей конкуренции со стороны стран Евросоюза и США требуется постоянное совершенствование технологий изготовления таких деталей с целью повышения прочностных свойств и снижения расходов на их изготовление.*

*При этом важную роль играет исследование изменения плотности материала при различных условиях деформирования на основании чего разработана технология горячего вальцевания и прокатки заготовки детали типа «лопатка направляющая компрессора высокого давления», которая предполагает обеспечение высокой прочности детали, а также повышение коэффициента использования металла.*

*Исследована прочность заготовки детали путем определения и сравнения плотности материала заготовки, подверженного горячему вальцеванию на ковочных вальцах, в момент времени до вальцевания и после него. Представлен анализ результатов проведенного исследования, который показал существенное увеличение прочности материала в связи с повышением его плотности. Результаты работы свидетельствуют о необходимости внедрения указанной технологии в серийное производство лопаток газотурбинных двигателей. Исследование проводилось в условиях производства ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют», на котором в настоящее время активно внедряется горячая вальцовка заготовок лопаток газотурбинных двигателей.*

**Ключевые слова:** вальцовка, прокатка, лопатка, компрессор высокого давления.

## Investigation of material density after rolling

**L.S. Kokhan, V.I. Punin, G.B. Rempel'**

*Vital parts of aircraft engines must comply with strict requirements concerning their ultimate strength and, especially, strength distribution over cross-sections. Furthermore, in the context of growing competition with the European Union and the United States, continuous improvement of manufacturing techniques for these parts is required in order to improve the strength properties and reduce the cost of their production. In this case, it is very important to study the change of material density under different deformation conditions. A hot rolling technology for the workpiece of a high-pressure compressor blade is developed. It enables high strength of the part and increases metal utilization. The strength of the workpiece is investigated by identifying and comparing the material density of the workpiece exposed to hot forge-rolling on forging rolls before and after rolling. The results of the study are analyzed. It is shown that the strength of the material significantly increases with increased density. The results indicate the need of im-*

plementing this technology in the production of gas turbine engine blades. This study was conducted in FSUE Gas Turbine SPC «Salut», which is currently introducing the hot forge-rolling of gas turbine engine blades.

**Keywords:** forge-rolling, rolling, blade, high-pressure compressor.

Из всей номенклатуры заготовок, применяемых в авиационной отрасли, свыше 40% составляют детали удлиненной формы с резкой разницей площадей поперечных сечений вдоль оси — лопатки, закрылки, стойки и др. Перспективным способом получения такого типа заготовок является процесс вальцовки на ковочных вальцах.

Для получения штамповки детали типа «лопатка направляющая компрессора высокого давления» (КВД) предлагается следующий технологический маршрут: прокатка из титанового сплава ВТ6 прутка необходимого диаметра, отрезка заготовки, электровысадка заготовки под цапфу, горячая вальцовка заготовки и последующая изотермическая штамповка.

Исходя из высокой степени деформации заготовки, необходимо установить, будет ли деталь, полученная методом горячего вальцевания, необходимо и достаточно прочной для работы в условиях повышенных температур и давления.

Для вальцовки с калибровкой по схеме «круг-овал», показанной на рис. 1, было установлено, что проверка правильности технологического режима операции проводится по двум вариантам: по сплошности материала детали и по величине плотности материала.

В первом варианте используем методику В.Л. Колмогорова [1], при которой определялась степень деформации сдвига  $\lambda$  и ее отношение к допустимой степени деформации при разрушении  $\lambda_p$ . Подробно применение этой методики к подобному варианту калибровки рассмотрено в статьях [2, 3]. Используемый запас пластичности

$$\psi = \frac{\lambda}{\lambda_p} = \frac{1,732}{7} = 0,237 < [\psi] = 0,25,$$

следовательно, процесс устойчив.

Во втором варианте проверку проводим по достигаемой плотности материала изделия. Данный параметр определялся эксперимен-

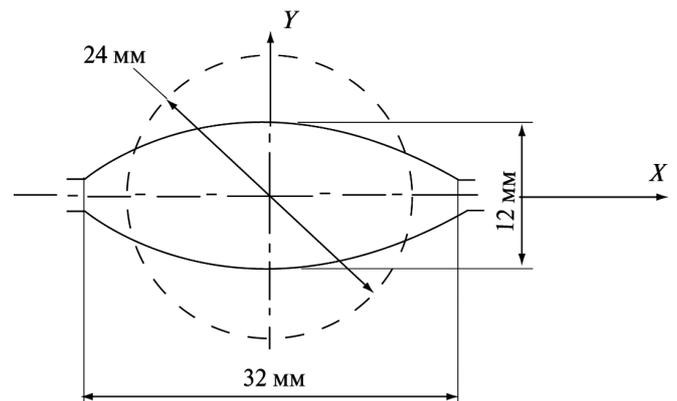


Рис. 1. Схема вальцовки с калибровкой «круг-овал»

тально и ему в настоящей статье уделено наибольшее внимание.

Исследование проводилось в условиях производства на предприятии ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют», на котором в настоящее время активно внедряется горячая вальцовка заготовок лопаток газотурбинных двигателей.

Для того чтобы выяснить как изменяется плотность материала по сечению заготовки при вальцовке был проведен следующий эксперимент. Вальцовка производилась на ковочных вальцах СА1335 (рис. 2) в одном секторном штампе. Были прокатаны 18 заготовок из титанового сплава ВТ6 диаметром 24 мм различной длины и 33 заготовки из стали Ст. 45 различных сечений и длин. Заготовки из титанового сплава прокатывались при температуре 970 °С, стальные заготовки — при 1 100 °С. Биение валков, а также их возможный прогиб при вальцовке контролировалось при помощи двух индикаторов часового типа ИЧ-25 с точностью измерений 0,005 мм, наконечники которых касались колец, установленных на верхний и нижний валки. Схема расположения индикаторных часов представлена на рис. 3.

В результате эксперимента были зафиксированы показания индикаторов при различных режимах вращения валков без вальцевания заготовки, при вальцевании и вновь без вальцевания заготовки. Первые и последние показания индикаторов совпали, показания при вальцовке отличаются от двух других, что свидетельствует о расхождении валков при вальцовке. Результаты всех измерений представлены в табл. 1.

Результаты измерений индикаторных часов на холостом ходу

Индикатор, мкм	Показание, мкм										Среднее время
Верхний	83	76	76	66	61	66	68	65	72	68	70,1
Нижний	-30	-31	-31	-31	-31	-32	-33	-32	-32	-32	-31,5
<i>Заготовки титановый сплав</i>											
Верхний	75	85	60	76	68	65	68	85	74	—	—
	75	80	78	75	75	65	85	80	75	—	74,7
Нижний	-22	-20	-18	-16	-20	-18	-17	-15	-18	—	—
	-22	-20	-22	-19	-18	-20	-20	-16	-18	—	-19
<i>Заготовки сталь — круг</i>											
Верхний	65	62	70	75	82	75	70	65	57	60	68,1
Нижний	-20	-18	-18	-20	-20	-16	-18	-20	-20	-16	-18,6
<i>Заготовки сталь — квадрат</i>											
Верхний	80	85	75	70	77	81	90	80	80	—	79,8
Нижний	-17	-15	-15	-18	-20	-20	-18	-18	-22	—	-18
<i>Заготовки сталь — повернутый квадрат</i>											
Верхний	65	70	50	63	—	—	—	—	—	—	62
Нижний	-17	-20	-18	-18	—	—	—	—	—	—	-18
<i>Заготовки сталь — прямоугольник</i>											
Верхний	50	55	55	60	55	70	70	50	52	52	56,9
Нижний	-20	-16	-22	-18	-21	-18	-18	-16	-15	-15	-17,9

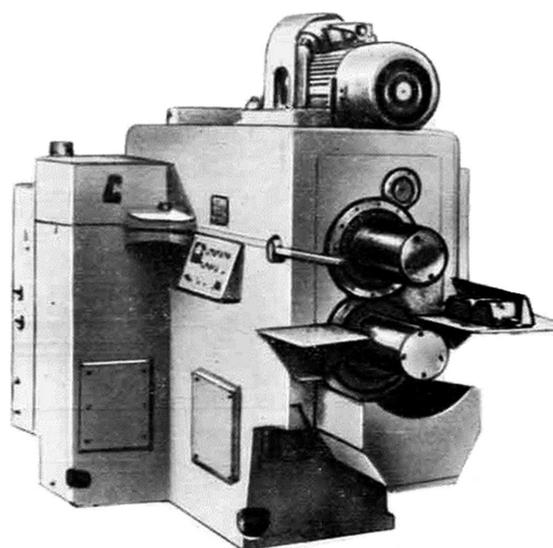


Рис. 2. Ковочные вальцы CA1335

Из партии заготовок под вальцовку были отобраны две заготовки из стали и титанового сплава, которые были разрезаны на сечения и кубики с одинаковыми размерами (рис. 4). Была измерена их плотность, а также сделаны шлифы для фотографирования микроструктуры и проверен химический состав материалов. После вальцовки были отобраны образцы, с которыми были проведены те же операции.

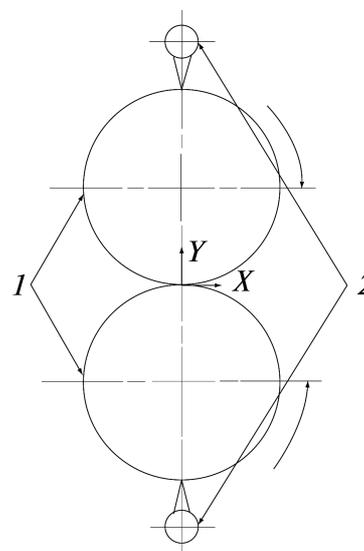


Рис. 3. Схема расположения индикаторных часов на ковочных вальцах:

1 — валки; 2 — индикаторные часы

Резка образцов производилась на электроэрозионном проволочно-вырезном станке SODICK AQ535L с точность 5 мкм.

Масса образцов измерялась на электронных весах Sartorius AGBP221 с точностью до 0,001 г, а объем — по типовой методике установленным на весах набором для измерения плотно-

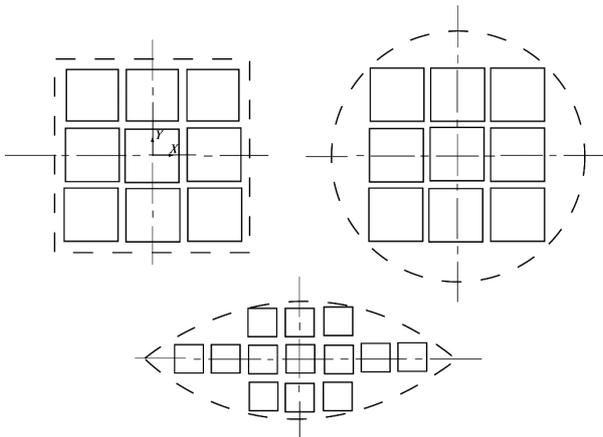


Рис. 4. Схема резки кубиков для измерения плотности материалов

сти Sartorius YDK 01, точностью 0,001 см<sup>3</sup>. Плотность образцов рассчитана по формуле

$$\rho = m / V,$$

где  $m$  — масса образца, г;  $V$  — объем образца, см<sup>3</sup>.

Сравнение результатов измерений массы, объема и плотности заготовок приведено в табл. 2.

По полученным значениям построены графические зависимости плотности от местоположения образца в заготовке (рис. 5, 6).

Как показывают многочисленные исследования, плотность значительно влияет на прочностные свойства изделий [4–6]. Так, по данным А.М. Лаптева [4], сопротивление пластической деформации

$$\sigma_T = \sigma_{\text{теор}} \rho^n,$$

где  $n$  — коэффициент плотности, для Ст. 45  $n = 3$ , для титанового сплава ВТ6  $n = 3,3$ ;  $\rho$  — относительная плотность,

Таблица 2

Результаты измерений массы, объема и плотности заготовок

До вальцовки Ст. 45 по сечению $m = 16,2$ г, $V = 2,06$ см <sup>3</sup> , $\rho = 7,84$ г/см <sup>3</sup>														
Номер измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9					
$m$ , г	1,77	1,77	1,78	1,77	1,76	1,78	1,79	1,78	1,77					
$V$ , см <sup>3</sup>	0,25	0,26	0,25	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,25					
$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	7,1	6,81	6,98	6,85	6,79	6,85	6,89	6,78	7,07					
После вальцовки Ст. 45 по сечению $m = 7,805$ г, $V = 0,998$ см <sup>3</sup> , $\rho = 7,82$ г/см <sup>3</sup>														
Номер измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
$m$ , г	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28	0,29	0,28	0,279	
$V$ , см <sup>3</sup>	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,037	
$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	7,6	7,59	7,55	7,62	7,51	7,64	7,64	7,53	7,53	7,65	7,47	7,7	7,587	
До вальцовки ВТ6 по сечению $m = 9,72$ г, $V = 2,22$ см <sup>3</sup> , $\rho = 4,38$ г/см <sup>3</sup>														
Номер измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9					
$m$ , г	0,7	0,69	0,69	0,7	0,7	0,7	0,7	0,71	0,71					
$V$ , см <sup>3</sup>	0,17	0,16	0,16	0,17	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17					
$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	4,19	4,2	4,2	4,21	4,25	4,19	4,19	4,18	4,18					
После вальцовки ВТ6 по сечению $m = 3,66$ г, $V = 0,82$ см <sup>3</sup> , $\rho = 4,44$ г/см <sup>3</sup>														
Номер измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
$m$ , г	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	
$V$ , см <sup>3</sup>	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	
$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	4,4	4,37	4,4	4,4	4,38	4,4	4,35	4,39	4,36	4,37	4,37	4,37	4,4	
Данные после первой штамповки ВТ6							Данные после второй штамповки ВТ6							
Номер измерения	1	2	3					1	2	3				
$m$ , г	0,16	0,16	0,16					0,16	0,16	0,16				
$V$ , см <sup>3</sup>	0,04	0,03	0,04					0,04	0,04	0,04				
$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	4,39	4,51	4,43					4,47	4,34	4,41				

Таблица 3

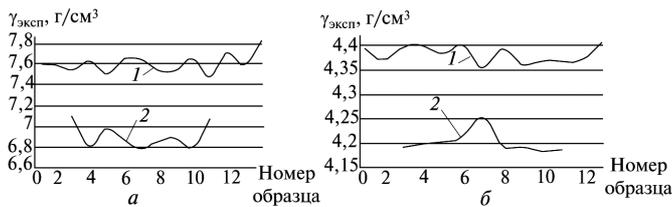


Рис. 5. Зависимость расчетной плотности образца от его положения для Ст. 45 (а) и титанового сплава (б), плотность образцов после вальцовки (1) и до вальцовки (2)

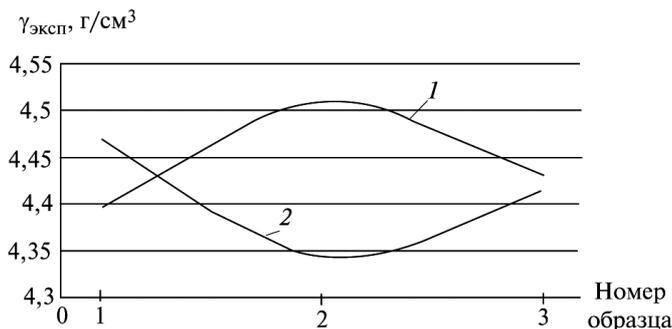


Рис. 6. Зависимость расчетной плотности образца от его положения для титанового сплава после изотермической штамповки (для двух групп образцов)

$$\rho = \gamma_{\text{эксп}} / \gamma_{\text{теор}}$$

Здесь  $\gamma_{\text{эксп}}$  — абсолютная плотность материала, полученная в результате эксперимента;  $\gamma_{\text{теор}}$  — справочное значение абсолютной плотности материала.

Результаты вычислений сопротивлений пластической деформации для Ст. 45 и титанового сплава ВТ6 представлены в табл. 3.

Плотность материала после изотермической штамповки показана на рис. 6. Значение плотности меняется от 4,39 до 4,51 г/см<sup>3</sup> или

$$\Delta = \frac{4,51 - 4,39}{4,51} \cdot 100\% = 2,4\%,$$

т. е. наблюдается небольшой положительный эффект. Однако в случае выполнения операции изотермической штамповки из круглого прутка степень деформации будет значительно выше, чем при штамповке заготовки овального сечения. Отсюда следует снижение прочностных свойств детали по сравнению с предложенным вариантом, а также уменьшение стойкости штамповой оснастки.

Следует отметить высокое значение коэффициента обжатия, равное 0,5. Допустимое значение коэффициента обжатия рассчитывается для каждого профиля отдельно, однако известно, что он редко превышает значение 0,5.

Результаты измерений массы, объема и плотности заготовок

Материал	Свойство					
	$\gamma_{\text{теор}}, \text{ г/см}^3$	$\gamma_{\text{эксп}}, \text{ г/см}^3$	$\sigma_{\text{т теор}}, \text{ МПа}$	$n$	$\rho$	$\sigma_{\text{т}}, \text{ МПа}$
Ст. 45 до вальцовки	7,826	6,901	245	3	0,818	134,1
Ст. 45 после вальцовки	7,826	7,59	245	3	0,97	223,6
Сплав ВТ6 до вальцовки	4,43	4,2	1044	3,3	0,948	875,3
Сплав ВТ6 после вальцовки	4,43	4,38	1044	3,3	0,989	1006,6
Сплав ВТ6 после штамповки	4,43	4,409	1044	3,3	0,995	1026,9

По данным отечественных и зарубежных исследований, описанных в статьях [5, 7, 8], при коэффициенте обжатия более 0,57 на поверхности вальцованных титановых заготовок наблюдаются неглубокие трещины, обусловленные быстрым остыванием твердого альфирированного слоя, т. е. газонасыщенного слоя, образующегося у титановых сплавов при нагревании до высоких температур. Трещины удаляются зачисткой. Таким образом, высокий коэффициент вытяжки в предложенной операции допустим.

Анализ представленных на рис. 5 и 6 зависимостей показывает, что предлагаемая технология значительно способствует повышению плотности материала и равномерности плотности материала. Так, для Ст. 45

$$\Delta\rho = \frac{7,59 - 6,901}{7,59} \cdot 100\% = 9,1\%;$$

для титанового сплава ВТ6

$$\Delta\rho = \frac{4,38 - 4,2}{4,38} \cdot 100\% = 4,1\%.$$

Очевидно, что плотность стали при рекомендуемом процессе обработки повышается значительно, чем плотность титанового сплава.

Кроме того, эксперименты доказывают, что стабильность распределения плотности также повышается. Так, для прокатанного прутка Ст. 45 разница плотности

$$\Delta\rho = \frac{7,1 - 6,78}{7,1} \cdot 100\% = 4,5\%,$$

после последующей вальцовки

$$\Delta\rho = \frac{7,7 - 7,47}{7,7} \cdot 100\% = 2,99\%.$$

Аналогично для прокатанного прутка титанового сплава ВТ6

$$\Delta\rho = \frac{4,25 - 4,18}{4,25} \cdot 100\% = 1,6\%,$$

после последующей вальцовки

$$\Delta\rho = \frac{4,4 - 4,35}{4,4} \cdot 100\% = 1,1\%.$$

Несмотря на весьма небольшие отличия в плотности до и после вальцовки, следует отметить, что исследование проводится для внедрения технологии горячего вальцевания в авиационное производство, где подобными разностями пренебрегать нельзя.

Анализ данных, приведенных в табл. 3, свидетельствует о сильной зависимости прочности материала от его плотности. Прочность Ст. 45 при предложенной обработке повышается на 40%, прочность титанового сплава ВТ6 — на 13%.

Опытно-производственные испытания, проведенные на кафедре «Обработка металлов давлением» в университете машиностроения и на промышленном предприятии ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют», подтвердили существенное повышение стабильности эксплуатационных свойств изделия.

### Литература

- [1] Колмогоров В.Л. *Механика обработки металлов давлением*. Москва, Металлургия, 1986. 688 с.
- [2] Кохан Л.С., Ремпель Г.Б. Оптимизация процесса калибровки при вальцовке. *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*, 2013, № 4, с. 43–47.
- [3] Кохан Л.С., Пунин В.И., Ремпель Г.Б. Вальцовка профилей с параболическим сечением. *Заготовительные производства в машиностроении*, 2013, № 3, с. 29–34.
- [4] Лаптев А.М., Подлесный С.В., Малюцкий В.Л. Расчет давлений при изостатическом прессовании порошков.

*Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*, 1987, № 1, с. 88–90.

[5] Кохан Л.С., Коростелев А.Б., Роберов И.Г., Мочалов Н.А. *Обработка давлением металлических материалов*. Москва, МГВМИ, 2009. 520 с.

[6] Целиков А.И., Томленов А.Д., Зюзин В.И. *Теория прокатки*. Москва, Металлургия, 1982. 335 с.

[7] Муzychук В.И., Шкрылев Р.В., Печенюк В.В. Исследование пластичности титановых сплавов при деформировании заготовок в калибрах различных систем. *Вибрации в технике и технологиях*, 2010, № 1 (57), с. 104–108.

[8] Hakan Karacaovali. Analysis of roll-forming process, *Graduate School of Natural and Applied Sciences*, september, 2005. 250 с.

### References

- [1] Kolmogorov V.L. *Mekhanika obrabotki metallov davleniem* [Mechanics of metal forming]. Moscow, Metallurgii publ., 1986. 688 p.
- [2] Kokhan L.S., Rempel' G.B. Optimizatsiia protsessa kalibrovki pri val'tsovke [Optimization of calibration process when forge-rolling]. *Stroitel'naia mekhanika inzhenernykh konstruksii i sooruzhenii* [Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings]. 2013, no. 4, pp. 43–47.
- [3] Kokhan L.S., Punin V.I., Rempel' G.B. Val'tsovka profilei s parabolicheskim secheniem [Forge-rolling of profiles in parabolic caliber]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii* [Procurement of production in engineering]. 2013, no. 3, pp. 29–34.
- [4] Laptev A.M., Podlesnyi S.V., Maliusskii V.L. Raschet davlenii pri izostaticheskom pressovanii poroshkov [The calculation of the pressure in the isostatic pressing of powders]. *Izvestiia Vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaia metallurgii* [Steel in Translation]. 1987, no. 1, pp. 88–90.
- [5] Kokhan L.S., Korostelev A.B., Roberov I.G., Mochalov N.A. *Obrabotka davleniem metallicheskih materialov* [Forming metal materials]. Moscow, Moscow state night iron and steel institute publ., 2009. 520 p.
- [6] Tselikov A.I., Tomlenov A.D., Ziuzin V.I. *Teoriia prokatki* [The theory of rolling]. Moscow, Metallurgii publ., 1982. 335 p.
- [7] Muzychuk V.I., Shkrylev R.V., Pecheniuk V.V. Issledovanie plastichnosti titanovykh splavov pri deformirovanii zagotovok v kalibrakh razlichnykh system [The study of plasticity during deformation of titanium alloy billets in various calibers systems]. *Vibratsii v tekhnike i tekhnologiakh* [Vibration in engineering and technology]. 2010, no. 1(57), pp. 104–108.
- [8] Hakan Karacaovali. Analysis of roll-forming process. *Graduate School of Natural and Applied Sciences*, september, 2005. 250 p.

Статья поступила в редакцию 23.10.2013

### Информация об авторах

**КОХАН Лев Соломонович** (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Обработка металлов давлением». Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ) (107023, Москва, Российская Федерация, ул. Б. Семёновская, д. 38).

**ПУНИН Владимир Иванович** (Москва) — кандидат технических наук, кафедра «Оборудование и технологии прокатки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: vipunin@mail.ru).

**РЕМПЕЛЬ Георгий Борисович** (Москва) — аспирант, кафедра «Обработка металлов давлением» (МАМИ), ведущий инженер ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют» (105118, Москва, Российская Федерация, пр. Буденного, д. 16).

### Information about the authors

**KOKHAN Lev Solomonovich** (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor of «Metal Forming» Department. Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI) (MAMI, B. Semenovskaya str., 38, 107023, Moscow, Russian Federation).

**PUNIN Vladimir Ivanovich** (Moscow) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, «Rolling Equipment and Technologies» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: vipunin@mail.ru).

**REMPEL' Georgiy Borisovich** (Moscow) — Post-Graduate, «Metal Forming» Department (MAMI), Leading Engineer of FSUE Gas Turbine SPC «Salut» (Budennogo ave., 16, 105118, Moscow, Russian Federation).