

**ОСОБЕННОСТИ НАГРЕВА СТАЛЕЙ ПОД ЗАКАЛКУ В ТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧАХ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ**

**А. И. Волошин\***, инж., **В. К. Заблоцкий\*\***, д. т. н., проф.,  
**В. Е. Фельдман\***, к. т. н., **А. И. Шимко\***, к. т. н.

*\* Новокраматорский машиностроительный завод*

*\*\* Донбасская государственная машиностроительная академия*

В общепринятых рекомендациях температуру закалки конструкционных сталей следует назначать при  $A_3 + 30...50\text{ }^\circ\text{C}$  [1]. Это связано с неравномерностью нагрева металла в печах и большой инерционностью регулирования температур  $\pm 20\text{ }^\circ\text{C}$ . Вместе с тем в литературе появились сведения о возможности повышения механических свойств сталей путем назначения температуры закалки при  $A_3 + 10\text{ }^\circ\text{C}$  [2, 3]. Для решения этой задачи в промышленных условиях требуются термические печи, обеспечивающие от заданной температуры  $\pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ .

Создание новых вертикальных термических печей для проведения режимов окончательной термической обработки, которые обладают автоматизированной системой управления агрегатом, многослойной футеровкой из керамоволокнистых огнеупоров, оптимальным размещением газогорелочных устройств и рациональным режимом сжигания топлива, надежной герметичностью, обуславливающих температурную однородность в рабочем пространстве печи  $\pm 5\text{ }^\circ\text{C}$  в диапазоне температур  $150...1100\text{ }^\circ\text{C}$ , позволило в полной мере удовлетворить всевозрастающие требования заказчиков по равномерности распределения механических свойств по длине и сечению заготовок.

За период 2004-2008 г.г. в условиях ЗАО «НКМЗ» изготовлено свыше 900 заготовок валов роторов для ветряных энергетических установок мощностью 1,5МВт и 2.0 МВт фирмы «Дженерал Электрик». Одним из основных требований, предъявляемых к качеству заготовок валов роторов, являлось соответствие значений твердости на их поверхности интервалу 265-295 НВ. При этом максимальное различие в значениях твердости в точках замеров для заготовки не должно превышать 30НВ. Измерение твердости осуществлялось в трех зонах по длине заготовок (2865 мм) - на шейках разных диаметров 840, 600 и 540 мм, - и в трех точках по окружности выбранного сечения, расположенных под углом  $120^\circ$  одна к другой.

Заготовки изготавливались из стали 34CrNiMo6. Окончательная термообработка состояла из закалки с температур 860-880 $^\circ\text{C}$  через воду (выдержка 6-14 мин) в масло (230-160 мин) и последующего высокого отпуска при 590-680 $^\circ\text{C}$ . Замер твердости на заготовках проводился на глубине  $\sim 3$  мм от наружной поверхности твердомером «Эквотип» с переводом единиц Лееба в единицы Бринелля по таблицам прибора. В случае получения неудовлетворительных результатов контрольных испытаний твердости заготовки подвергались дополнительной термической обработке – отпуску (при превышении установленных значений -  $> 295\text{НВ}$ ) или повторной закалке с отпуском (при недоста-

точном уровне твердости - < 265 НВ). Полную термическую обработку допускать проводить повторно только один раз.

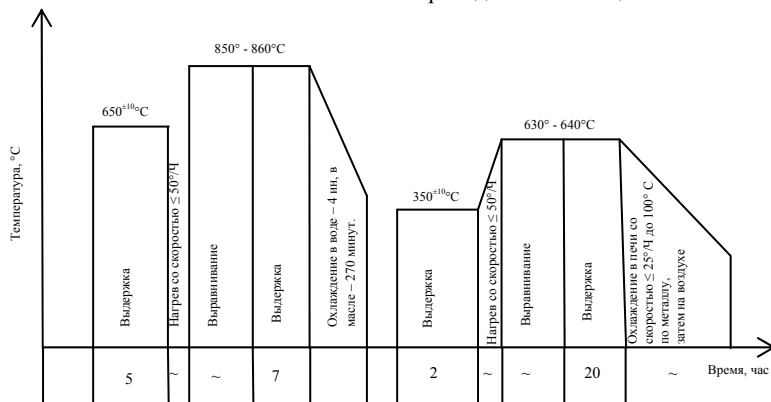
Из 702 заготовок валов роторов 1,5 МВт и 2,0 МВт, окончательная термообработка которых проводилась в новых термических печах, по причине завышенных значений твердости на тонкой концевой шейке (в пределах 298-317 НВ) дополнительному отпуску при более высокой температуре подвергались 9 заготовок (1,3% от подвергавшихся термообработке). Параллельно термическая обработка выполнялась и в вертикальных газовых печах старой конструкции. По результатам замера твердости на 217 заготовках, прошедших термическое улучшение на этом оборудовании, 29 заготовок (13,4%) подвергались дополнительной термической обработке - 8 (3,7%) полному циклу и 21 (9,7%) дополнительному отпуску.

Анализируя результаты испытаний вдоль оси заготовок, удовлетворяющие установленному интервалу 265-295НВ, следует отметить, что твердость увеличивается в направлении от шеек большего диаметра (околофланцевая часть) к шейкам малого диаметра (концевая часть стержня). При этом максимальная разница в значениях твердости на заготовках, прошедших термическое улучшение в печах новой конструкции, составляет вдоль оси 19 НВ, а по окружности - в шейках наибольшего диаметра - 7 НВ. В заготовках, окончательная термообработка которых выполнялась в печах существующей модели, разница в уровне твердости по окружности шейки наибольшего диаметра составила 16 НВ, вдоль оси заготовки - 30 НВ.

Таким образом, воплощенные в устройство вновь созданного термического оборудования новейшие конструктивные, теплотехнические, функциональные разработки обеспечили температурную однородность рабочего пространства печей, позволившую достичь равномерного нагрева металла заготовок до заданных технологией температур по длине и сечению. Полученные результаты измерения твердости показали полное превосходство технологических характеристик новых тепловых агрегатов над существующими моделями термических печей по достижению равномерности распределения механических свойств в заготовке. Существующая разница в значениях твердости по длине заготовок валов роторов, проходивших окончательную термическую обработку в новых печах, обусловлена проявлением неоднородности распределения химических элементов, прежде всего, углерода (донная часть слитка соответствует фланцевой части вала ротора, прибиальная - концевой шейке стержня). В то время как разницу в значениях твердости вдоль оси заготовок, подвергавшихся термическому улучшению в печах старой конструкции, следует отнести за счет не только неравномерности в распределении ликвирующих элементов в металле исходного слитка, но и, в большей степени, за счет неоднородности температур в объеме печи. Ярким подтверждением тому является максимальное различие в значениях твердости в трех точках по окружности на одном сечении заготовок - 7 НВ в новых печах, 16 НВ - в печах старой конструкции.

Еще в большей степени достигнутая однородность температурного поля рабочего пространства вновь созданных термических вертикальных печей проявилась при проведении окончательной термической обработки заготовок

роторов из стали 35ХНЗМФА. Заготовки подвергались закалке с охлаждением вначале в воде, затем в масле и высокому отпуску. Режим окончательной термической обработки заготовок роторов представлен на рис. 1. Результаты механических испытаний пяти заготовок приведены в таблице 1.



**Рис. 1** Режим окончательной термической обработки заготовок роторов из стали 35ХНЗМФА (закалка с отпуском)

Рассматривая результаты испытаний механических свойств по длине и сечению всех заготовок роторов производственного заказа, следует отметить, что во всех без исключения контролируемых зонах уровень прочностных, пластических и вязких характеристик свойств удовлетворяет предъявляемым требованиям. Для заготовок характерно традиционное распределение механических свойств по длине: в направлении от донной части поковки (место отбора проб для испытаний А) к прибыльной (Е) возрастает значения предела текучести и временного сопротивления разрыву и уменьшаются показатели относительного удлинения, относительного сужения и ударной вязкости. Особое внимание необходимо обратить на разность в прочностных показателях свойств на концах заготовок. Для многих изделий ответственного назначения эта характеристика распределения свойств по длине ограничивается положениями стандартов или технических условий. В анализируемых заготовках максимальная разница в значениях временного сопротивления по концам заготовки соответствует 25 Н/мм<sup>2</sup>, что весьма высоко характеризует степень однородности свойств при значениях этого показателя в интервале 867-892 Н/мм<sup>2</sup> (заготовка 6837).

Нельзя не отметить высокий уровень свойств осевой зоны поволоков. Так, превышение предела прочности материала центральной зоны сечения заготовок над установленным уровнем (785 Н/мм<sup>2</sup>) составляет 6-11%, в то время как аналогичный показатель уровня прочностных свойств в поверхностных зонах (бочка заготовок) и в зоне на 1/3 радиуса от поверхности (концы заготовок) равен 5-16% и 6-15% соответственно. Благодаря равномерному прогреву сечения по всей длине заготовок, достигнутому в новых печах за счет оптимально-

## Строительство, материаловедение, машиностроение

го размещения газогорелочных устройств и создаваемой температурной однородности печного пространства, получена столь высокая степень однородности свойств по сечению крупногабаритных заготовок.

*Таблица 1*  
*Результаты испытаний механических свойств заготовок роторов из стали 35ХНЗМФА*

Номер заготовки	Место отбора проб	Направление отбора	Механические свойства					
			$\sigma_t$ , н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_b$ , н/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	KCV, Дж/см <sup>2</sup>	KCU, Дж/см <sup>2</sup>
6837	A	продольн.	716,724	868,867	18,9;18,6	64, 63	184,198	244,251
	B	тангенц.	718,716	853,858	18,2;18,0	62,59	163,159	206,198
	C	продольн.	723,719	875,861	17,9;16,3	58,56	99,98	121,123
	D	тангенц.	749,752	900,891	18,0;17,6	61,61	147,159	197,189
	E	продольн.	742,756	887,892	18,6;18,2	62,63	156,164	211,217
6927	A	продольн.	695,682	844,830	20,2;20,4	66,67	184,178	220,194
	B	тангенц.	697,685	837,824	20,0;20,2	64,64	152,166	188,182
	C	продольн.	675,682	835,832	17,4;17,0	51,49	78,76	97,101
	D	тангенц.	706,724	852,870	18,4; 18,6	58,58	147,151	166,162
	E	продольн.	704,688	845,832	18,2;18,4	63,64	142,136	178,192
7149	A	продольн.	711,706	851,848	18,0;18,0	66,66	142,156	213,194
	B	тангенц.	766,792	887,908	17,8;17,0	61,58	137,145	150,156
	C	продольн.	706,698	850,846	16,8;16,6	62,62	80,85	103,109
	D	тангенц.	781,794	899,906	17,6;17,2	61,59	141,147	153,168
	E	продольн.	740,736	871,872	18,2;18,0	64,64	148,139	181,189
7150	A	продольн.	713,707	866,869	18,4;18,0	69,69	198,151	182,195
	B	тангенц.	749,735	877,862	20,0;20,1	63,64	138,134	205,262
	C	продольн.	696,706	840,847	15,8;16,4	45,47	66,67	88,87
	D	тангенц.	782,764	905,886	19,2;19,4	59,60	153,150	196,169
	E	продольн.	740,733	882,885	18,8;18,2	65,66	156,145	204,201
7280	A	продольн.	724,738	879,882	18,4; 18,2	64,63	147,145	167,162
	B	тангенц.	767,781	894,901	17,6;17,2	59,61	132,141	162,169
	C	продольн.	708,703	852,846	16,9;17,1	58,63	69,72	84,89
	D	тангенц.	777,790	898,913	17,1;17,0	61,60	127,135	157,163
	E	продольн.	739,750	890,902	18,2;18,0	62,64	141,137	161,159
Требуемый уровень свойств	A	продольн.	≥ 638	≥ 785	≥ 18,0	≥ 55	≥ 78,5	≥ 98,1
	B	тангенц.	≥ 638	≥ 785	≥ 17,0	≥ 45	≥ 58,9	≥ 68,7
	C	продольн.	≥ 638	≥ 785	≥ 15,0	≥ 42	≥ 44,1	инфо.
	D	тангенц.	≥ 638	≥ 785	≥ 17,0	≥ 45	≥ 58,9	≥ 68,7
	E	продольн.	≥ 638	≥ 785	≥ 18,0	≥ 55	≥ 78,5	≥ 98,1

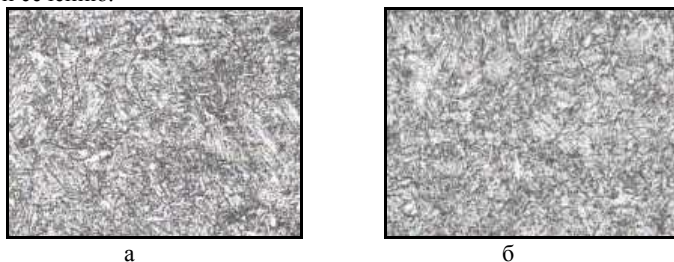
В целом, превышение полученных свойств заданных техническими условиями значений характерно для всех анализируемых заготовок и составляет по:

пределу текучести	-	7...24%
пределу прочности	-	5...16%
относительному удлинению	-	до 18% (отн.)
относительному сужению	-	13...42% (отн.)
ударной вязкости	-	в 1,5...2,7 раза

Очень важно и то, что обрабатываемые заготовки вместе с оснасткой занимали по высоте все рабочие зоны вновь созданного термического оборудования – от нижнего яруса до верхних зон рабочего пространства печей. И во всех зонах были достигнуты требуемая по технологии температура аустенитизации, равномерный прогрев по сечению, обусловившие получение однородных по длине и сечению прочностных, пластических и вязких свойств материала. Незначительную разницу в свойствах по длине следует отнести за счет влияния ликвации, прежде всего, углерода, а также легирующих элементов в процессе кристаллизации крупного слитка.

Что касается существенно более низких значений ударной вязкости металла осевых зон сечения по сравнению с поверхностными зонами, то это явление связано с особенностью распада аустенита в центральных зонах сечения и в зонах у поверхности заготовок. Более интенсивное (с большей скоростью) охлаждение наружных зон сечения заготовок обеспечило распад аустенита с образованием структур нижнего бейнита, о чем наглядно свидетельствует структурное состояние металла на расстоянии  $1/3$  радиуса от поверхности заготовок  $\varnothing 490$  мм (рис.2, а) и в поверхностном слое бочки  $\varnothing 1034$  мм (рис. 2, б). Центральные зоны сечения охлаждались с меньшей скоростью, что характерно для крупных поковок (сечение бочки –  $\varnothing 1034$  мм) в процессе закалки. Менее интенсивное охлаждение обусловило распад аустенита центральных зон сечения с формированием структур верхнего бейнита. И если различие структурных превращений в срединных зонах сечения и в наружных слоях заготовок менее всего сказывается на разнице в уровне прочностных и пластических свойств в этих участках заготовок, то разница в значениях ударной вязкости весьма существенна – в  $1,5 \dots 3$  раза металл поверхностных зон превышает уровень ударной вязкости металла осевой зоны сечения заготовок.

Тем не менее следует признать, что окончательная термическая обработка крупногабаритных заготовок, проведенная в новых печах, позволила обеспечить довольно высокий и однородный уровень механических свойств по их длине и сечению.



**Рис. 2.** Микроструктура образца на расстоянии  $1/3$  радиуса от наружной поверхности заготовки  $\varnothing 490$  мм (а) и в поверхностном слое бочки  $\varnothing 1034$  мм (б),  $\times 500$

В практике термической обработки общепринятым положением при назначении температуры аустенитизации для закалки или нормализации заготовок из доэвтектидных сталей является правило  $A_{C3} + 30 \dots 60^\circ C$ . Это правило существует много лет и, по всей видимости, одна из основных причин его появления обусловлена стремлением достичь необходимой температуры в каждой точке сечения обрабатываемой заготовки. Превышение температур  $A_{C3}$  на несколько десятков градусов нивелирует влияние неоднородности распределения температур в объеме рабочего пространства печей существовавших конструкций на качественный прогрев сечения заготовки в процессе ее окончательной термообработки.

Однако целесообразность соблюдения этого правила при выполнении окончательной термообработки в печах новой конструкции была поставлена

под сомнение. Обладание термическим оборудованием, обеспечивающим высокую степень однородности температурного поля в рабочем пространстве  $\pm 5^\circ\text{C}$ , дало основание «нарушить» традиционный подход к назначению температуры аустенитизации при окончательной термической обработке заготовок из конструкционных сталей. Это «нарушение» было продиктовано и необходимостью снижения затрат при термообработке заготовок за счет уменьшения расхода энергоресурсов. Ведь нагрев до более высоких температур и продолжительное нахождение заготовок при этих температурах для прогрева всего обрабатываемого сечения и качественной перекристаллизации требовали большего расхода природного газа, чем при обеспечении в печном пространстве температур меньшего уровня.

Заготовки втулок  $\varnothing_{\text{нар}}1260/\varnothing_{\text{вн}}880$  мм длиной 5900 мм из стали состава (в вес.%): C = 0,17-0,19; Mn = 1,42-1,45; Mo = 0,09-0,10; V = 0,08-0,09 подвергали нормализации с отпуском (640-660°C). Первые три заготовки (3703, 3743, 5938) термическую обработку проходили в вертикальной газовой печи старой модели, вторые три заготовки (5969, 6656, 6783) - в вертикальных термических печах после их коренной реконструкции. При определении температуры аустенитизации для заготовок, нормализация которых осуществлялась в печах старой конструкции, соблюдали традиционный подход: для стали, имеющей значения критической точки  $A_{C3}$  850°C, назначили нагрев на температуру 900-910°C. Нормализацию заготовок во вновь созданных печах проводили от температур нагрева  $A_{C3} + 10^\circ\text{C}$ , т.е. приняли энергосберегающий режим, основываясь на высокой однородности температурного поля во всем рабочем пространстве новых печей. Остальные параметры окончательной термической обработки – скорость нагрева, продолжительность выдержки и температура на промежуточной остановке до достижения температуры перекристаллизации, выдержка при температуре аустенитизации, условия охлаждения с температур нормализации, температурные и временные параметры высокого отпуска – были одинаковыми для двух групп заготовок.

Отбор проб от каждой заготовки для проведения механических испытаний проводился с двух сторон на расстоянии 80 мм от наружной поверхности. Результаты испытаний механических свойств приведены в таблице 2

Как видно из полученных результатов испытаний, значения прочностных ( $\sigma_r$ ,  $\sigma_b$ ) и пластических ( $\delta$ ,  $\Psi$ ) характеристик механических свойств заготовок, подвергавшихся нормализации от температур 900-910°C ( $A_{C3} + 50^\circ\text{C}$ ) и 860-870°C ( $A_{C3} + 10^\circ\text{C}$ ) (рис. 3) находятся практически на одном уровне. По прочностным показателям свойств металл анализируемых заготовок удовлетворяет предъявляемым требованиям, а значения пластических и вязких характеристик значительно превышают установленный уровень. Заметна разница в значениях работы удара металла заготовок после нормализации от температур 900-910°C по сравнению со значениями вязкой составляющей свойств у заготовок после нормализации от температур 860-870°C. Следует отметить, что охлаждение на воздухе с температур аустенитизации 860-870°C формирует структуры, которые обладают не только более высоким уровнем работы удара, но и более равномерными ее значениями при испытании трех образцов.

Превышение вязкой характеристики свойств металла после нормализации от температур  $A_{C3} + 10^{\circ}\text{C}$  над работой удара металла после нормализации  $900-910^{\circ}\text{C}$  составляет, в среднем, в донной части заготовок 35-44%, в прибыльной части 63-75%.

Таблица 2

Механические свойства втулок

Номер заготовки	Механические свойства					
	$\sigma_r, \text{н/мм}^2$	$\sigma_b, \text{н/мм}^2$	$\delta, \%$	$\Psi, \%$	KV, Дж	Твердость
3703	362	588	30,2	66	54,60,49/54 <sub>ср</sub>	175
	375	608	26,4	64	33,48,42/41 <sub>ср</sub>	180
3743	366	580	29,9	68	62,48,57/57 <sub>ср</sub>	173
	368	578	28,4	69	37,44,51/44 <sub>ср</sub>	173
5938	377	585	31,8	65	67,49,71/54 <sub>ср</sub>	175
	383	597	29,6	62	39,55,32/42 <sub>ср</sub>	178
5969	381	588	29,6	72	72,78,69/73 <sub>ср</sub>	175
	384	595	28,8	70	68,74,75/72 <sub>ср</sub>	178
6656	378	602	27,9	68	77,70,79/75 <sub>ср</sub>	179
	382	599	26,4	66	69,72,66/69 <sub>ср</sub>	178
6783	374	592	29,8	69	81,76,71/76 <sub>ср</sub>	177
	388	607	26,2	64	72,65,63/67 <sub>ср</sub>	180
<b>Требуемый уровень свойств</b>	<b><math>\geq 360</math></b>	<b><math>\geq 520</math></b>	<b><math>\geq 18</math></b>	<b><math>\geq 40</math></b>	<b><math>\geq 18</math></b>	<b>-</b>



а



б

**Рис. 3.** Микроструктура образцов от прибыльной части заготовки, прошедшей режим нормализации от температур  $860-870^{\circ}\text{C}$  (а, 7 номер шкалы ГОСТ 5639-82) и  $900-910^{\circ}\text{C}$  (б, 5-7 номер шкалы ГОСТ 5639-82) с последующим отпуском  $640-660^{\circ}\text{C}$ ,  $\times 100$

Исследования микроструктуры (рис. 3) свидетельствуют о том, что после нормализации  $860-870^{\circ}\text{C}$  феррито-перлитная структура более равномерная по величине зерен, оцениваемой 7 номером шкал ГОСТ 5639-82. Феррито-перлитная структура металла заготовки после нормализации  $900-910^{\circ}\text{C}$  обладает выраженной разнотернистостью, о чем свидетельствует сочетание в структуре зерен 7 номера с зернами, размер которых оценивается 5 номером шкал этого стандарта. Мелкозернистая и в большей степени однородная по величине зерна феррито-перлитная структура металла заготовок, прошедших нормализацию  $860-870^{\circ}\text{C}$ , обуславливает более высокий уровень значений

вязких свойств. По всей видимости, незначительное повышение температуры на 50-60°С выше  $A_{C3}$  при выдержке металла исследуемого состава при нормализации вызывает рост зерна, что, в конечном итоге, снижает показатели вязких характеристик механических свойств.

Таким образом, нагрев на температуру  $A_{C3} + 10^{\circ}\text{C}$  при окончательной термообработке выгоден не только с позиций энергосбережения, но и с позиций качества: незначительное превышение температур  $A_{C3}$  не вызывает укрупнение зерна исходного аустенита и способствует образованию при последующем охлаждении мелкозернистой структуры, что улучшает механические свойства доэвтектоидных сталей.

### ВЫВОДЫ

Обеспечить соблюдение правила  $A_{C3} + 10^{\circ}\text{C}$  при назначении температуры аустенитизации в ходе проведения режима окончательной термообработки в печах старой конструкции весьма проблематично. Проведенное обследование состояния существующих вертикальных печей выявило существенную разницу в температурах по рабочим зонам печей, которая в несколько раз превосходила величину необходимого превышения над критической точкой  $A_{C3}$  при выполнении энергосберегающих режимов. Коренная реконструкция вертикальных термических печей с объемом рабочего пространства  $\varnothing 2600 \times 10000$  мм, одной из основных целей которой являлось обеспечение температурной однородности в рабочем пространстве печи  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ , позволяет реализовать новые направления в технологии окончательной термообработки доэвтектоидных сталей в результате применения целого комплекса технологических и конструктивных решений, а именно:

- использования современных газогорелочных устройств и оптимального их размещения, обеспечивающих активное перемешивание печных газов и формирующих температурное поле рабочего пространства с высокой степенью однородности;
- рационального выбора многослойной композиции огнеупорных материалов на основе разработанного графоаналитического метода определения необходимых характеристик керамоволокнистых изделий;
- осуществления автоматизированного ведения режима с использованием микропроцессорной техники;
- обеспечения герметичности печного оборудования за счет оригинальных конструктивных разработок.

Создание современного автоматизированного теплотехнического оборудования обеспечивает проведение режимов окончательной термической обработки согласно установленным параметрам, гарантирующим соответствующий мировым требованиям уровень свойств и качества заготовок.

### Использованная литература

1. Гуляев А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1988 – 647 с.
2. Заблоцкий В.К. Формирование аустенитной структуры при нагреве доэвтектоидных сталей / В.К. Заблоцкий, В.Е. Фельдман. – Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии, 2006 - №2(4) – С.138 – 143.
3. Белкин М.Я. Фельдман В.Е. Особенности получения поковок ответственного назначения // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні / Краматорськ, 2004. – С. 406 – 409.