

УДК 621.89: 621.762: 621.822

doi:10.20998/2413-4295.2020.03.01

## АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ ADI ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ЗАКАЛКИ

К. А. ГОГАЕВ<sup>1</sup>, Ю. Н. ПОДРЕЗОВ<sup>2</sup>, С. М. ВОЛОЩЕНКО<sup>1</sup>, М. Г. АСКЕРОВ<sup>1\*</sup>,  
Н. В. МИНАКОВ<sup>2</sup>, Ю. Ф. ЛУГОВСКОЙ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>отдел № 10, ИПМ НАН Украины, Киев, УКРАИНА

<sup>2</sup>отдел № 08, ИПМ НАН Украины, Киев, УКРАИНА

<sup>3</sup>отдел № 59, ИПМ НАН Украины, Киев, УКРАИНА

\*e-mail: mukafatask@gmail.com

**АННОТАЦИЯ** Исследовано влияние температуры изотермического закалывания на механические свойства ADI материалов. Термообработка опытных образцов составляла с нагрева выше температуры превращения ферритной составляющей в аустените и изотермического закалывания при температурах от 280 до 380 °С. В указанных диапазонах температур изучались пластические характеристики и параметры прочности образцов в зависимости от режимов термообработки. Особое внимание обращено на параметры деформационного упрочнения. Установлено, что при температурах изотермического закалывания в диапазоне 330-360 °С при пластической деформации появляется TRIP эффект, появление которого сопровождается высокой скоростью упрочнения, за счет преобразования остаточного аустенита в мартенсит. Пластические характеристики меняются с увеличением температуры закалки. При 280 °С прочность и твердость металла максимальная, а пластические свойства минимальны. Механические свойства исследованного бейнитного чугуна, закаленного при различных температурах удовлетворяют требованиям ASTM 897-90 кроме образцов закаленных при 400 °С. Твердость, предел текучести, предел прочности уменьшаются с повышением температуры закалки, пластичность и ударная вязкость увеличивается. При сжатии наблюдается два участка упрочнения: в области малых деформаций скорость изменения напряжения тем выше, чем ниже температура закалки, в области больших деформаций, наоборот, скорость упрочнения значительно выше в материалах, закаленных при более высоких температурах. Эффект объясняется изменением механизма упрочнения от дислокационного - при малых деформациях к TRIP эффекту при больших.

**Ключевые слова:** изотермическая закалка; ADI материалы; TRIP эффект; остаточный аустенит; мартенсит; пластическая деформация; температура закалки; бейнитный чугун

## ANALYSIS OF ADI STRAIN STRENGTHENING AT ISOTHERMAL TEMPERATURES HARDENING

К. GOGAEV<sup>1</sup>, Y. PODREZOV<sup>2</sup>, S. VOLOSCHENKO<sup>1</sup>, M. ASKEROV<sup>1</sup>, N. MINAKOV<sup>2</sup>,  
Y. LUGOVSKOY<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department № 10, IPMS NAS of Ukraine, Kyev, UKRAINE

<sup>2</sup>Department № 08, IPMS NAS of Ukraine, Kyev, UKRAINE

<sup>3</sup>Department № 59, IPMS NAS of Ukraine, Kyev, UKRAINE

**ABSTRACT** The effect of isothermal hardening temperature on the mechanical properties of ADI materials is investigated. The heat treatment of the test samples amounted to heating above the temperature of transformation of the ferrite component in austenite and isothermal hardening at temperatures from 280 to 380 °C. In the indicated temperature ranges, the plastic characteristics and strength parameters of the samples were studied depending on the heat treatment conditions. Particular attention is paid to the strain hardening parameters. It was found that at isothermal hardening temperatures in the range of 330-360 °C with plastic deformation, the TRIP effect appears, the appearance of which is accompanied by a high hardening rate due to the conversion of residual austenite to martensite. Plastic characteristics change with increasing quenching temperature. At 280 °C, the strength and hardness of the metal is maximum, and the plastic properties are minimal. The mechanical properties of the studied bainitic iron, quenched at various temperatures, satisfy ASTM 897-90 requirements except for samples quenched at 400 °C. Hardness, yield strength, and tensile strength decrease with increasing quenching temperature, ductility and impact strength increase. During compression, two sections of hardening are observed: in the region of small deformations, the rate of change of stress is higher, the lower the temperature of quenching, in the region of large deformations, on the contrary, the rate of hardening is much higher in materials quenched at higher temperatures. The effect is explained by a change in the hardening mechanism from dislocation - at small strains to the TRIP effect at large.

**Keywords:** isothermal hardening; ADI materials; TRIP effect; residual austenite; martensite; plastic deformation; hardening temperature; bainitic cast iron

### Введение

Высокопрочный чугун с шаровидной формой графита (ВЧШГ) - материал, который сочетает

высокую прочность и удовлетворительную пластичность. В конце прошлого столетия созданием этого материала занимались такие украинские ученые как профессор К.И. Ващенко и его ученики,

работавшие в НАН Украины. [1-3]. Дальнейшее совершенствование этого материала связано с использованием специальной термической обработки, которая получила название аустемперинга (austempering), а полученный в результате такой обработки чугун был назван ADI (austempering ductile iron).

Изотермическая закалка чугуна при температурах 280 - 400 °С обеспечивает формирование ауст-ферритной структуры, которая склонна к распаду под действием пластической деформации с образованием мартенситной фазы [4,5]. Этот особый механизм упрочнения, получивший название TRIP - (transformation induce plasticity) эффект, способствует повышению сопротивления износу благодаря образованию высокопрочного деформированного слоя на поверхности трения, повышению усталостных характеристик [6-8].

Поскольку ADI является сложным материаловедческим объектом, проблема достижения необходимых служебных характеристик требует учета многих факторов, способных влиять на процесс структурообразования. Это позволяет в широком диапазоне варьировать технологические параметры для получения максимальных результатов. В частности, в предыдущих работах нами было: определен состав чугуна [6,9], оптимизированы условия его получения в литом состоянии, отработаны режимы термической обработки [9,10]; определен оптимальный состав модификаторов и разработана технология получения модификаторов путем прокатки порошков [11]; установленные режимы изотермического закалывания при которых образуется большое количество остаточного аустенита, склонного к распаду при пластическом деформировании [6,12]; установлены механизмы влияния остаточного аустенита на формирование механических свойств и параметров износа бейнитного высокопрочных чугунов [11,13]. Это позволило разработать технологические принципы производства бейнитного чугуна для его применения при изготовлении деталей сменного оборудования почвообрабатывающей сельхозтехники [11,14,15].

Однако, в реальных условиях базовую информацию о свойствах ADI получают из механических испытаний. Согласно требованиям международного стандарта ASTM 897-90, распределения ADI материалов по категориям (grades) проводится с учетом пять основных механических характеристик: твердость, HB, ударную вязкость, KС, предел текучести,  $\sigma_{02}$ , предел прочности,  $\sigma_{max}$ , и деформацию до разрушения  $\delta$ , (испытания на растяжение). Однако, при изменении технологических параметров (например, температуры закалки) все вышеуказанные характеристики меняются монотонно и по этим изменениям трудно

определить условия, при которых реализуется TRIP эффект.

### Цель работы

Исследование влияния температуры изотермической закалки на механические свойства и параметры деформационного упрочнения ADI. Особое внимание обращено на особенности механического поведения, которые напрямую связаны с мартенситным превращением под действием деформации.

### Материал и методика

Исследования проводились на образцах чугуна (3,44% С; 2,62% Si; 0,73% Mn; 0,024Cr; 0,54% Cu; 0,71% Ni). Химический состав обеспечивал в основном перлитоферритную структуру металлической матрицы, при твердости в литом состоянии на уровне 315-320НВ. Шаровидная форма графита была получена за счет применения модификатора, который состоял из 7,5% Mg, 35% СК25, 17% Al. Структура чугуна создавалась в результате аустенизирующего отжига при 900 °С с выдержкой в течение 30 мин и последующей изотермической закалки в жидком олове при температурах 280, 310, 330, 350, 370 и 400 °С с выдержкой в течение 90 мин.

На образцах, полученных по разным режимам термообработки, был проведен комплекс механических испытаний. Испытания на растяжение и сжатие выполнялись на испытательных машинах CERAMTEST и UTS - 100, измерения твердости, HB, методом Бринелля по стандартной методике, ударной вязкости на копре КД-300.

### Результаты экспериментов

В табл. 1 приведены результаты механических испытаний, полученных в результате осреднения минимум 5 измерений.

Изменение твердости с температурой имеет тенденцию к уменьшению с ростом температуры закалки, но резкое снижение твердости наблюдается только при низких температурах закалывания. Минимальные значения ударной вязкости ~ 30 Дж/см<sup>2</sup> демонстрируют исходные образцы и образцы, которые закалены при 400 °С. После температуры закалки 380 °С материал демонстрирует наибольшую ударную вязкость 90 Дж/см<sup>2</sup>. Эту температуру следует рассматривать, как верхнюю границу интервала, где формируется структура аустемперинга. В интервал температур закалки 350 - 280 °С ударная вязкость несколько снижается, но остается на уровне 55-45 Дж/см<sup>2</sup>.

Табл. 1 – Механические свойства образцов ADI после изотермического закаливания при различных температурах

T <sub>из.випр.</sub> , °C	$\sigma_{02}$	$\sigma_m$	$\delta$	НВ	КС	H/ $\sigma_{02}$
	МПа	МПа	%		Дж/см <sup>2</sup>	
280	1043	1432	2,4	447	49	0,428571
310	910	1237	3,4	397	51,5	0,436264
330	824	1116	2,8	345	45	0,418689
350	751	1041	3,2	347	55	0,462051
380	673	880	3,8	323	90	0,479941
400	602	876	1,1	357	26	0,593023

Предел текучести и предел прочности уменьшаются с ростом температуры изотермической закалки. Важно, что предел прочности меняется с температурой закаливания быстрее, чем предел текучести. Полученные значения деформации до разрушения для всех структурных состояний находятся в пределах 2,5 – 4 %. Наблюдается тенденция к незначительному повышению с ростом температуры закалки. Исключением является образец, закаленный при температуре 400 °C, который демонстрирует аномально низкую равномерную деформацию.

Обобщая полученные результаты, следует заметить, что свойства материалов, закаленных при 280 до 370 °C, укладываются в 5 grades по классификации ASTM 897-90. Образцы закаленные на 400 °C находятся за пределами регламентированных

значений, что указывает на то, что эта термообработка не является эффективной для реализации преимуществ аустоперинга.

Из полученных данных видно, что чувствительность твердости к изменению температуры закалки значительно меньше, чем для предела текучести. Как следствие, соотношение между твердостью и пределом текучести существенно увеличивается с понижением температуры закалки. Этот эффект, как и более быстрая смена разрушающего напряжения по сравнению с пределом текучести, объясняется различиями в механизмах упрочнения материалов, закаленных при различных температурах.

Механические свойства образцов ADI, испытанных на сжатие, приведены в табл. 2.

Табл. 2 – Механические свойства образцов ADI, испытанных на сжатие

T <sub>из.випр.</sub> , °C	$\sigma_{02}$	$\sigma_{max}$	$\delta$	$\sigma_8$	НВ <sub>ср</sub>	НВ/ $\sigma_8$	$\theta$
	МПа	МПа	%	МПа			МПа
вихідні	737,6	1697,9	24,96	1116	310	0.36	
280	1020,0	2217,7	12,85	1590	447	0.35	3130
310	876,5	2338,9	24,33	1317	399	0.33	3420
330	732,0	2229,6	22,29	1152	360	0,32	4340
350	739,0	1961,1	23,01	1117	344	0,34	3480
380	681,0	2116,7	26,77	1135	323	0,35	4610

Сравнительный анализ результатов испытаний на растяжение и сжатие показал, что характер изменения предела текучести с температурой в обоих случаях похож, хотя абсолютные значения при испытаниях на сжатие примерно на 10% выше, что свидетельствует о наличии SD-эффекта, который

характеризует различие (stress diferential) в деформирующем напряжении при растяжении и сжатии. Чаще всего этот эффект наблюдается в дисперсно-упрочненных материалах и связан с образованием пор вокруг дисперсных частиц при концентрации дислокаций вблизи границ раздела.

Ввиду наличия графитовых включений, этот механизм может работать в чугунах с сфероидезованным графитом.

Значительные изменения соотношения  $H/\sigma_{0.2}$ , приведенные в табл. 1, можно объяснить, учитывая, что соотношение между твердостью и напряжением течения является постоянной величиной только при 8% деформации. При такой деформации коэффициент пропорциональности между этими величинами равен 0,3. Испытания на сжатие позволяют определить напряжения течения при деформации 8% и определить соотношение между этим напряжением и твердостью. Приведенные в табл. 2 экспериментально определенные значения этого соотношения близки к 0,3 и слабо меняются с температурой закалки. То есть, обнаруженная аномалия соотношения между твердостью и пределом текучести связана с различными законами упрочнения в материалах, закаленные при различных температурах. Поскольку при сжатии схема нагружения является более "мягкой", чем при растяжении, деформация до разрушения значительно больше и для всех температур изотермической закалки изменяется в диапазоне 25-30%. Это позволяет проанализировать влияние условий закалки на закономерности упрочнения в широком интервале деформаций.

В работе [16] А. Нафаль первым обратил внимание на особое поведение кривых упрочнения (ADI) материалов. Из анализа кривых упрочнения в работе [16] сделан вывод, что при более высоких деформациях механизм меняется благодаря деформационным процессам, вызванных мартенситным превращением, которые активизируются, когда деформация аустенита исчерпана. Увеличение степени деформации, стимулирует мартенситное превращение.

### Выводы

Механические свойства исследованного бейнитного чугуна, закаленного при различных температурах удовлетворяют требованиям ASTM 897-90 кроме образцов закаленных при 400 °С. Твердость, предел текучести, предел прочности уменьшаются с повышением температуры закалки, пластичность и ударная вязкость увеличивается.

При сжатии наблюдается два участка упрочнения: в области малых деформаций скорость изменения напряжения тем выше, чем ниже температура закалки, в области больших деформаций, наоборот, скорость упрочнения значительно выше в материалах, закаленных при более высоких температурах. Эффект объясняется изменением механизма упрочнения от дислокационного - при малых деформациях к TRIP эффекту при больших.

### Список литературы

1. Ващенко К. И., Софрони Л. *Магнийевый чугун*. Киев: Mashgiz., 1960. 485 с.

2. Волощенко М. В. *Термическая обработка высокопрочного чугуна*. К.: Гостехиздат УССР, 1961. 97 с.
3. Найдек В. Л., Гаврилюк В. П., Неижко И. Г. *Бейнитный высокопрочный чугун*. К., 2008. 140 с.
4. Kim H., Lee J., Barlat F., Kim D., Lee M.-G. Experiment and modeling to investigate the effect of stress state, strain and temperature on martensitic phase transformation in TRIP-assisted steel. *Acta Materialia*. 2015. 97. P. 435-444. doi: 10.1016/j.actamat.2015.06.023.
5. Li X. H., Saal P., Gan W. M., Hoelzel M., Volk W., Petry W., Homann M. Strain-Induced Martensitic Transformation Kinetic in Austempered Ductile Iron (ADI). *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2018. 49. P. 94-104. doi: 10.1007/s11661-017-4420-3.
6. Гогаев К. О., Подрезов Ю. М., Волощенко С. М. *Новые области использования высокопрочных чугунов. Наука про матеріали: досягнення та перспективи*. Т.1. К.: Академпер., 2018. 652 с.
7. Yang C., Northwood D. O., Liu Ch. Effect of prior martensite on mechanical properties of austempered ductile iron. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*. 2018. Vol. 6. No. 3. P. 455-462. doi: 10.2495/CMEM-V6-N3-455-462.
8. Babazadeh M., Pourasiabi H. Wear Characteristics of ADIs; A Comprehensive Review on Mechanisms and Effective Parameters. *J. Basic. Appl. Sci. Res.* 2013. 3(2). P. 646-656.
9. Волощенко С. М. Бейнітний високоміцний чавун для ґрунтообробної техніки. *Агронерспектива*. 2006. № 7. С. 50-51.
10. Волощенко С. М., Гогаев К. О., Радченко О. К., Аскеров М. Г., Варченко В. Т. Дослідження властивостей високоміцного чавуну для лемешів в залежності від хімічного складу та режимів термообробки. *Зб.наук.праць «Вісник Донбаської державної машинобудівної академії»*. Краматорськ. 2008. № 1(11). С. 56-61.
11. Волощенко С. М., Гогаев К. О., Радченко О. К., Шейко О. І., Аскеров М. Г. Спосіб виготовлення модифікатора. Патент України № 88530. Бюл. № 20-2009.
12. Волощенко С. М., Непомнящий В. В., Аскеров М. Г., Мосина Т. В., Бега Н. Д. Влияние термической обработки на фазовый состав и свойства высокопрочного чугуна. *Сталь*. 2013. № 8. С. 64-69.
13. Гогаев К. А., Подрезов Ю. Н., Волощенко С. М., Гринкевич К. С., Ткаченко И. В., Коваленко М. В. Влияние температуры и условий нагружения на характеристики износа бейнитного чугуна. *Проблеми тертя та зношування*. 2017. №3(76). С. 42-51.
14. Антонещ С. С., Волощенко С. М., Гогаев К. О., Миропольский О. М., Резинка Г. М., Семчук Г. І. Робочий орган культиватора. Патент України № 99964. Бюл. № 12 05.06.15.
15. Гогаев К. О., Волощенко С. М. Бейнітний чавун для швидкозношуваних змінних деталей сільгосптехніки. *Вісник Національної академії наук України*. 2015. № 9. С. 64-68.
16. Nofal A. Advances in the Metallurgy and Applications of ADI. *Journal of Metallurgical Engineering (ME)*. 2012. Vol. 2. Issue 1. P. 1-18.

### References (transliterated)

1. Vashhenko K. I., Sofroni L. *Magnievyy' chugun*. Kiev, Mashgiz, 1960, 485 p.

2. Voloshhenko M. V. *Termicheskaya obrabotka vy'sokoprochnogo chuguna*. K., Gostekhizdat USSR, 1961, 97 p.
3. Najdek V. L., Gavrilyuk V. P., Neizhko I. G. *Bejnitny'j vy'sokoprochny'j chugun*. K., 2008, 140 p.
4. Kim H., Lee J., Barlat F., Kim D., Lee M.-G. Experiment and modeling to investigate the effect of stress state, strain and temperature on martensitic phase transformation in TRIP-assisted steel. *Acta Materialia*, 2015, 97, pp. 435-444, doi: 10.1016/j.actamat.2015.06.023.
5. Li X. H., Saal P., Gan W. M., Hoelzel M., Volk W., Petry W., Homann M. Strain-Induced Martensitic Transformation Kinetic in Austempered Ductile Iron (ADI). *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2018, 49, pp. 94-104, doi: 10.1007/s11661-017-4420-3.
6. Gogayev K. O., Podrezov Yu. M., Voloshhenko S. M. *Novy'e oblasti ispol'zovaniya vy'sokoprochny'kh chugunov. Nauka pro materi'ali: dosyagnennyya ta perspektivi*. T.1, K., Akademper., 2018, 652 p.
7. Yang C., Northwood D. O., Liu Ch. Effect of prior martensite on mechanical properties of austempered ductile iron. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, 2018, Vol. 6, no. 3, pp. 455-462, doi: 10.2495/CMEM-V6-N3-455-462.
8. Babazadeh M., Pourasiabi H. Wear Characteristics of ADIs; A Comprehensive Review on Mechanisms and Effective Parameters. *J. Basic. Appl. Sci. Res.*, 2013, 3(2), pp. 646-656.
9. Voloshhenko S. M. Bejni'tnij visokomi'cznij chavun dlya g'runtoobrobnoyi tekhniki. *Agroperspektiva*, 2006, 7, pp. 50-51.
10. Voloshhenko S. M., Gogaev K. O., Radchenko O. K., Askerov M. G., Varchenko V. T. Dosli'dzhennyya vlastivostej visokomi'cznogo chavunu dlya lemishi'v v zalezhnosti' vi'd khi'michnogo skladu ta rezhimi'v termoobrobki. *Zb.nauk.praz' «Vi'snik Donbas'koyi derzhavnoyi mashinobudi'vnoyi akademi'yi»*, Kramatorsk, 2008, 1(11), pp. 56-61.
11. Voloshhenko S. M., Gogayev K. O., Radchenko O. K., Shejko O. G., Askerov M. G. Sposi'b vigotovlennyya modifi'katora. Patent Ukrayini № 88530. Byul. № 20-2009.
12. Voloshhenko S. M., Nepomnyashhij V. V., Askerov M. G., Mosina T. V., Bega N. D. Vliyanie termicheskoy obrabotki na fazovy'j sostav i svojstva vy'sokoprochnogo chuguna. *Stal'*, 2013, 8, pp. 64-69.
13. Gogaev K. O., Podrezov Y. M., Voloschenko S. M., Tkachenko I. V., Kovalenko M. V. The influence of temperature and loading conditions on wear parameters of bainitic cast iron. *Problems of friction and wear*, 2017, 3(76), pp. 42-51.
14. Antonecz' S. S., Voloshhenko S. M., Gogayev K. O., Miropol'skij O. M., Rezinka G. M., Semchuk G. G. Robochij organ kul'tivatora. Patent Ukrayini № 99964. Byul. № 12. 05.06.15.
15. Gogayev K. O., Voloshhenko S. M. Bejni'tnij chavun dlya shvidkoznoshuvanikh zmi'nnikh detalej si'l'gospstekhni'ki. *Vi'snik Naczi'onal'noyi akademi'yi nauk Ukrayini*, 2015, 9, pp. 64-68.
16. Nofal A. Advances in the Metallurgy and Applications of ADI. *Journal of Metallurgical Engineering (ME)*, 2012, Vol. 2, Issue 1, pp. 1-18.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Гогаев Казбек Александрович** - доктор технических наук, профессор, Институт проблем материаловедения НАН Украины, зав. отделом №10 ИПМ НАН Украины, г. Киев, Украина; e-mail: gogaev@ipms.kiev.ua.

**Kazbek Gogaev** - doctor of technical, professor, Institute of Problems of Materials Science of NAS of Ukraine, head of Department №10 of IPM of NAS of Ukraine, Kyev, Ukraine; e-mail: gogaev@ipms.kiev.ua.

**Подрезов Юрий Николаевич** - доктор физико-математических наук, Институт проблем материаловедения НАН Украины, зав. отделом №08 ИПМ НАН Украины, г. Киев, Украина; e-mail: yupodrezov@ukr.net.

**Yuriy Podrezov** - Doctor of Physics and Mathematics, Institute of Materials Science, NAS of Ukraine, Head of Department № 08 of the IPM NAS of Ukraine, Kyev, Ukraine; e-mail: yupodrezov@ukr.net.

**Волощенко Сергей Михайлович** - доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем материаловедения НАН Украины, старший научный сотрудник отдела №10 ИПМ НАН Украины, г. Киев, Украина; e-mail: volosch@ipms.kiev.ua.

**Sergey Voloshchenko** - doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, Institute for Problems of Materials Science of the National Academy of Sciences of Ukraine, Senior Researcher, Department №10 of IPM of NAS of Ukraine, Kyev, Ukraine; e-mail: volosch@ipms.kiev.ua.

**Аскеров Мукафат Гейбат оглы** - кандидат технических наук, Институт проблем материаловедения НАН Украины, старший научный сотрудник отдела №10 ИПМ НАН Украины, г. Киев, Украина; e-mail: mukafatask@gmail.com.

**Askerov Mukafat Geibat ogly** - candidate of technical sciences, Institute for Problems of Materials Science of the National Academy of Sciences of Ukraine, senior researcher of the department №10 of IPM of NAS of Ukraine, Kyev, Ukraine; e-mail: mukafatask@gmail.com.

**Минаков Николай Вениаминович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, отдел №08 ИПМ НАН Украины, г. Киев, Украина; e-mail: mukafatask@gmail.com.

**Nikolay Minakov** – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Department № 08 of IPM of NAS of Ukraine, Kyev, Ukraine; e-mail: mukafatask@gmail.com.

**Луговской Юрий Федорович** – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, отдел №59 ИПМ НАН Украины, г. Киев, Украина; e-mail: mukafatask@gmail.com.

**Yuri Lugovskoy** – Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, Department №59 of IPM of NAS of Ukraine, Kyev, Ukraine; e-mail: mukafatask@gmail.com.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

Гогаев К. А., Подрезов Ю. Н., Волощенко С. М., Аскеров М. Г., Минаков Н. В., Луговской Ю. Ф. Анализ деформационного упрочнения ADI при температурах изотермической закалки. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 1 (3). С. 3-8. doi:10.20998/2413-4295.2020.03.01.

*Please refer to this article as follows:*

Gogaev K., Podrezov Y., Voloshchenko S., Askerov M., Minakov N., Lugovskoy Y. Analysis of strain hardening of ADI at isothermal hardening temperatures. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 1 (3), pp. 3–8, doi:10.20998/2413-4295.2020.03.01.

*Будь ласка, посилайтеся на цю статтю таким чином:*

Гогаєв К. О., Подрезов Ю. М., Волощенко С. М., Аскеров М. Г., Минаков М. В., Луговський Ю. Ф. Аналіз деформаційного зміцнення ADI при температурах ізотермічного загартування. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 1 (3). С. 3-8. doi:10.20998/2413-4295.2020.03.01.

**АНОТАЦІЯ** Досліджено вплив температури ізотермічного загартування на механічні властивості ADI матеріалів. Термообробка дослідних зразків становила з нагріву вище температури перетворення феритної складової в аустеніті і ізотермічного загартування при температурах від 280 до 380°C. У зазначених діапазонах температур вивчалися пластичні характеристики і параметри міцності зразків в залежності від режимів термообробки. Особливу увагу спрямовано на параметри деформаційного зміцнення. Встановлено, що при температурах ізотермічного гартування в діапазоні 330-360°C при пластичної деформації з'являється TRIP ефект, поява якого супроводжується високою швидкістю зміцнення, за рахунок перетворення залишкового аустеніту в мартенсит. Пластичні характеристики змінюються зі збільшенням температури гарту. При 280°C міцність і твердість металу максимальна, а пластичні властивості мінімальні. Механічні властивості дослідженого бейнітного чавуну, загартованого при різних температурах задовольняють вимогам ASTM 897-90 крім зразків загартованих при 400 ° C. Твердість, межа плинності, межа міцності зменшуються з підвищенням температури гарту, пластичність і ударна в'язкість збільшується. При стисненні спостерігається дві ділянки зміцнення: в області малих деформацій швидкість зміни напруги тим вище, чим нижче температура гарту, в області великих деформацій, навпаки, швидкість зміцнення значно вище в матеріалах, загартованих при більш високих температурах. Ефект пояснюється зміною механізму зміцнення від дислокаційного - при малих деформаціях до TRIP ефекту при великих.

**Ключові слова:** ізотермічна гарт; ADI матеріали; TRIP ефект; залишковий аустеніт; мартенсит; пластична деформація; температура гарту; бейнітний чавун

Поступила (received) 11.02.2020