

УДК 620.171.2

## МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ АЛЮМИНИЯ НА ВЫНОСЛИВОСТЬ И ДРУГИЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАЛОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Алексеев К.В., Дарвейш С.М., Добролюбов А.Н., Лебедев Е.Л., Самойлов Н.С.  
ФГКВОУ ВПО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского», Санкт-Петербург,  
e-mail: vka@mail.ru

В работе представлены методика и результаты оценивания влияния на механические свойства нашедших в настоящее время широкое применение в машиностроении малоуглеродистых сталей (трип-сталей) содержащегося в них алюминия. С этой целью проведены механические испытания ряда трип-сталей на одноосное растяжение, ударную вязкость, а также определены их твердость и выносливость. В результате механических испытаний для каждого исследуемого образца получены зависимости прочности и пластичности, ударной вязкости и выносливости от содержания в стали алюминия. Анализ данных зависимостей показывает следующее. Наиболее высокая прочность ( $\sigma_B = 853,42$  МПа) наблюдается у исследуемых сталей с наибольшим содержанием алюминия. Однако для этих сталей характерно снижение характеристик пластичности ( $\delta = 19,459\%$ ;  $\varphi = 52,16\%$ ). С другой стороны, наиболее высокая пластичность ( $\delta = 21,622\%$ ;  $\varphi = 69,75\%$ ) наблюдается у стали, которая, в свою очередь, характеризуется самой низкой прочностью ( $\sigma_B = 788,35$  МПа). Результаты определения твердости изучаемых сталей качественно согласуются с характером изменения прочности. С точки зрения обеспечения максимальных показателей ударной вязкости, оптимальным можно считать содержание алюминия в стали 0,062%, так как интегральный показатель механических характеристик, а именно работа разрушения, имеет в данном случае максимальное значение. Определено, что в отличие от других механических характеристик изменение содержания алюминия в рассматриваемых пределах на выносливость исследуемых сталей практически не влияет.

**Ключевые слова:** трип-сталь, механические испытания, механические характеристики

## THE METHODOLOGY FOR ESTIMATING THE EFFECT OF ALUMINUM CONTENT ON THE TOUGHNESS AND OTHER MECHANICAL PROPERTIES OF LOW CARBON STEELS

Alekseev K.V., Darveish S.M., Dobrolyubov A.N., Lebedev E.L., Samoilov N.S.  
Mozhaisky Military Space Academy, Sankt-Petersburg, e-mail: vka@mail.ru

In the article presents the methodology and results of estimating the effect on the mechanical properties found currently in wide use in the engineering of low-carbon steels (TRIP steels) contained aluminum. For this purpose, conducted mechanical testing of a number of trip-steels on uniaxial tensile tests, impact strength, as well as determined by their hardness and toughness. As a result of mechanical tests for each test sample obtained dependence of strength and ductility, toughness and stamina from the content in the steel aluminum. The data analysis shows the following dependencies. The highest strength ( $\sigma_B = 853,42$  MPa) are observed in the investigated steels with the highest aluminum content. However, these steels are characterized by the decrease of the characteristics of plasticity ( $\delta = 19,459\%$ ;  $\varphi = 52,16\%$ ). On the other hand, the highest ductility ( $\delta = 21,622\%$ ;  $\varphi = 69,75\%$ ) is observed in steel, which in turn is characterized by the lowest strength ( $\sigma_B = 788,35$  MPa). The results of the hardness of the investigated steels are in qualitative agreement with the pattern of change in strength. From the point of view of providing maximum performance optimum toughness can be considered as the aluminum content in the steel 0,062%, as an integral indicator of the mechanical characteristics, namely the work of destruction, has in this case the maximum value. Determined that unlike other mechanical characteristics of the change in the aluminum content in the present limits of endurance of the investigated steels is practically not affected.

**Keywords:** TRIP steel, mechanical testing, mechanical characteristics

В настоящее время широкое применение в машиностроении приобретают углеродистые стали с различным содержанием алюминия и кремния. Данные стали получили название «трип-стали» и отличаются от традиционных углеродистых сталей хорошим сочетанием технологических и эксплуатационных свойств [5, 8]. Однако вопросы влияния содержания алюминия на механические свойства трип-сталей с целью обоснования их практического применения для конкретных целей изучены недостаточно.

### Цель исследования

Цель исследования заключается в определении зависимости механических харак-

теристик ряда трип-сталей от содержания в них алюминия, для чего выполнялись испытания на одноосное растяжение, ударную вязкость, а также определялись их твердость и выносливость. Оценивание именно этих свойств обусловлено условиями практического применения данных материалов.

### Материалы и методы исследования

Исследования проводились для четырех наиболее характерных углеродистых сталей с содержанием алюминия и кремния, химический состав которых показан в табл. 1.

Отливки, которые были использованы при изготовлении образцов для механических испытаний, выполнялись согласно [3]. Были использованы отливки двух видов, а именно:

- отливки, предназначенные для изготовления образцов для испытаний на одноосное растяжение;
- отливки, предназначенные для изготовления образцов для испытаний на растяжение и ударную вязкость.

Необходимо отметить, что фазовый состав исследуемых сплавов в основном ферритный с включениями цементита по границам зерен. Кроме этого, для фазового состава важно наличие твердых растворов или химических соединений легирующих элементов в железе. Основное отличие представленных для анализа сплавов заключается в различном содержании алюминия. Анализ влияния этого элемента в сочетании с влиянием кремния на механические характеристики и коррозионную стойкость трип-сталей и был проведен в представленной работе.

Испытания на одноосное растяжение выполнялись в соответствии с [1]. Для испытаний использовалась установка ИР-5113-100. Геометрические параметры образцов для испытаний на одноосное растяжение показаны в табл. 2.

При испытаниях на одноосное растяжение образцы устанавливались в захваты установки и подвергались растяжению со скоростью деформирования 1 мм/мин. Испытания проводились при комнатной температуре по пять образцов для каждой стали.

Испытания на ударную вязкость выполнялись согласно [2]. Для испытаний использовались маятниковый копер МК-15 и образцы с концентратором напряжения в виде надрезов U-образной формы.

Твердость образцов исследуемых сталей определялась с помощью твердомера Роквелла.

Пределы выносливости исследуемых сталей  $\sigma_{-1}$  по известным значениям пределов прочности  $\sigma_B$  определялись, исходя из ранее установленных закономерностей связи между выносливостью материала и его прочностью [7]. С этой целью была использо-

вана номограмма для определения коэффициента корреляции при расчете предела выносливости по известной величине предела прочности металлических материалов [7].

Для нашего случая по известным значениям пределов прочности с использованием данной номограммы определяются значения коэффициентов корреляции  $a$ , и по известной формуле [7] вычисляются пределы выносливости  $\sigma_{-1}$ :

$$\sigma_{-1} = a\sigma_B, \text{ МПа.}$$

### Результаты исследования и их обсуждение

В результате испытаний на одноосное растяжение для каждого образца была получена диаграмма «напряжения (усилия) – деформация». Вид данной диаграммы и «шейка» образца после разрушения показаны на рис. 1.

Анализ диаграммы «напряжение (усилие) – деформация» показал, что для данных сплавов отсутствует характерная для обычных углеродистых сталей «площадка текучести», что говорит об отсутствии в них интенсивной деформации по плоскостям скольжения [4].

Разрушение образцов происходило на начальном этапе путем среза с последующим хрупким отрывом (рис. 2).

Зависимость прочностных характеристик (временного сопротивления разрыву  $\sigma_B$ ) и характеристик пластичности (относительного удлинения после разрыва  $\delta$  и относительного сужения после разрыва  $\phi$ ) исследуемых сплавов показаны на рис. 3.

Таблица 1

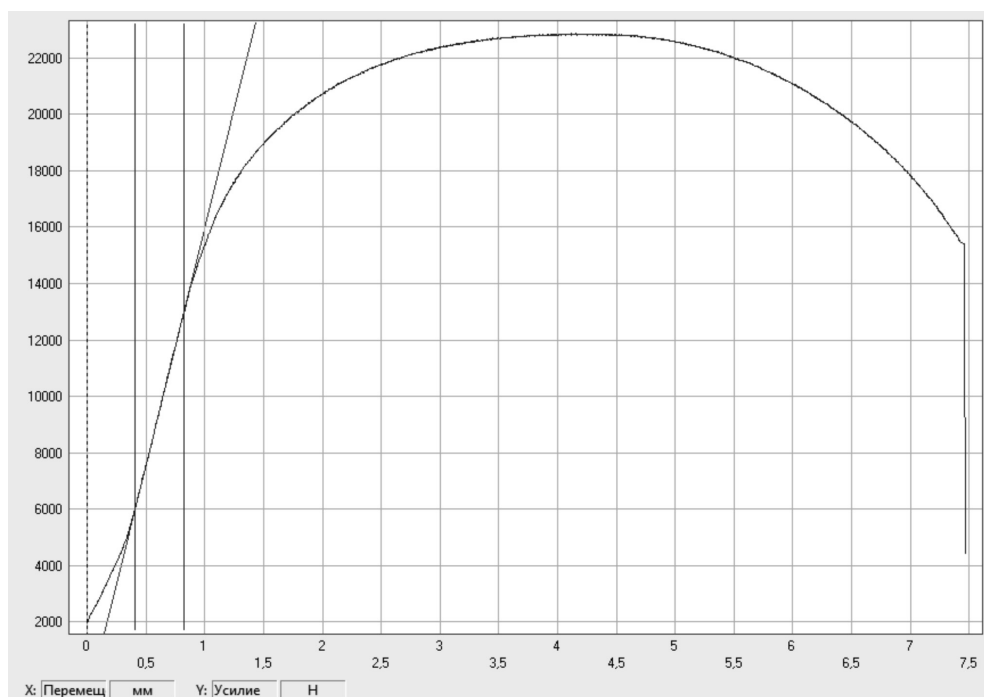
Химический состав исследуемых сталей

| № сплава | C     | Si   | Mn   | P     | S      | Al    | Cr  | Ni   | Mo   | Cu    | V     | Nb    | B      | Ti    | N      |
|----------|-------|------|------|-------|--------|-------|-----|------|------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|
| 1        | 0,088 | 0,29 | 1,64 | 0,008 | 0,0083 | 0,031 | 0,2 | 0,51 | 0,40 | 0,018 | 0,028 | 0,026 | 0,0017 | 0,001 | 0,0049 |
| 2        | 0,088 | 0,30 | 1,62 | 0,007 | 0,0080 | 0,062 | 0,2 | 0,48 | 0,41 | 0,018 | 0,027 | 0,026 | 0,0016 | 0,001 | 0,0043 |
| 3        | 0,089 | 0,30 | 1,63 | 0,007 | 0,0071 | 0,091 | 0,2 | 0,50 | 0,40 | 0,018 | 0,028 | 0,026 | 0,0000 | 0,001 | 0,0050 |
| 4        | 0,088 | 0,30 | 1,66 | 0,008 | 0,0060 | 0,120 | 0,2 | 0,50 | 0,40 | 0,019 | 0,028 | 0,026 | 0,0018 | 0,002 | 0,0044 |

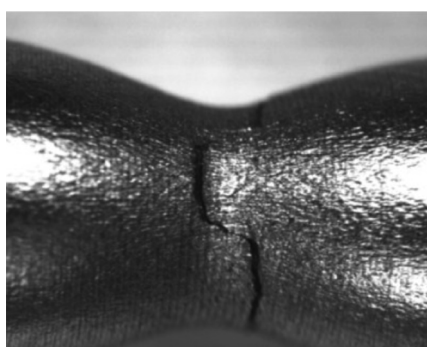
Таблица 2

Геометрические параметры образцов для испытаний на одноосное растяжение

| Параметр, обозначение                |    | Номинальное значение, мм | Отклонение, мм |
|--------------------------------------|----|--------------------------|----------------|
| Диаметр рабочей части                | d0 | 6                        | ± 0,06         |
| Диаметр захватов                     | d1 | M10                      |                |
| Радиус                               | R  | 5                        | ± 0,05         |
| Длина рабочей части                  | Lc | 36                       | + 2/– 0        |
| Общая длина                          | Lt | 65                       | ± 2            |
| Отклонение формы поперечного сечения | t  | 0,03                     |                |

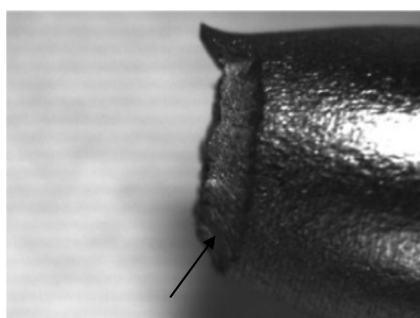


а)

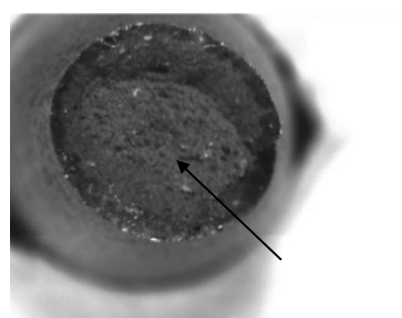


б)

Рис. 1. Диаграмма растяжения для исследуемых сплавов и характер «шейки» образца после разрушения: а) диаграмма «напряжение (усилие) – деформация» для исследуемых сплавов; б) «шейка» образца после разрушения



а)



б)

Рис. 2. Характер разрушения образцов: а) зона начального разрушения методом среза; б) зона окончательного разрушения методом отрыва

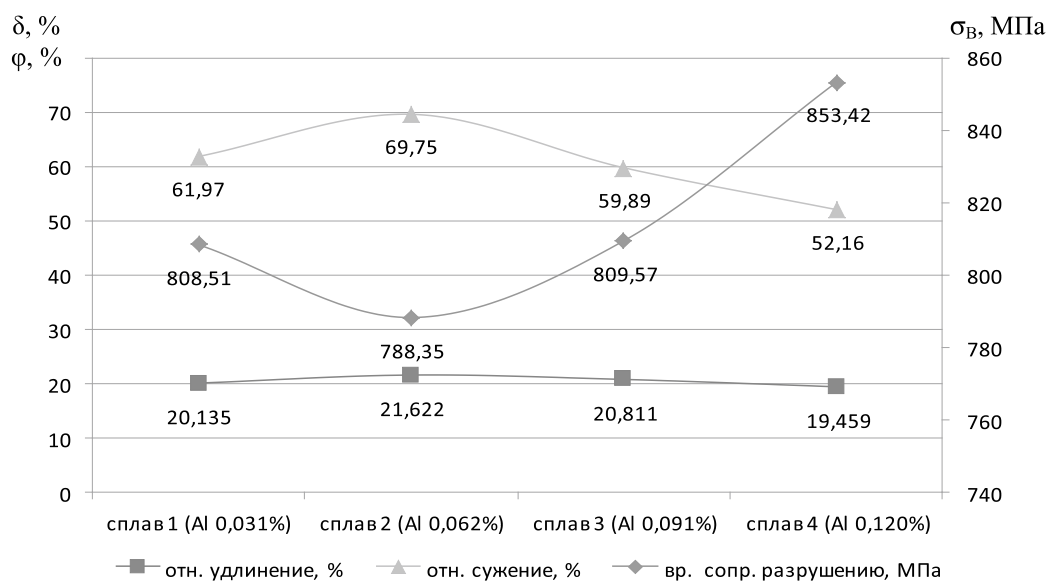


Рис. 3. Зависимость характеристик прочности и пластичности исследуемых сплавов от содержания алюминия

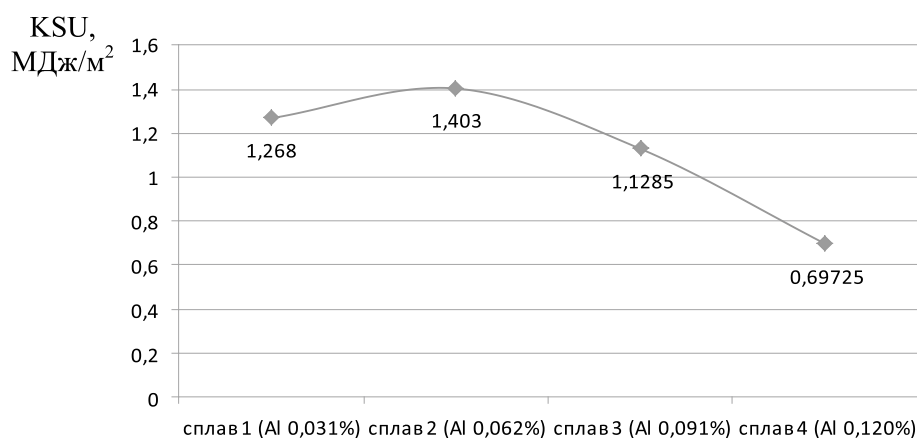


Рис. 4. Зависимость ударной вязкости исследуемых сплавов от содержания алюминия

Таблица 3

Результаты определения твердости исследуемых сталей

| № сплава                   | 1        |    |    | 2        |    |    | 3        |    |    | 4        |    |    |
|----------------------------|----------|----|----|----------|----|----|----------|----|----|----------|----|----|
| Значение твердости, HRC    | 13       | 11 | 15 | 10       | 13 | 11 | 12       | 15 | 12 | 14       | 12 | 16 |
| Среднее значение, HRC (HB) | 13 (201) |    |    | 12 (197) |    |    | 13 (201) |    |    | 14 (203) |    |    |

Таблица 4

Результаты определения пределов выносливости

| № сплава | $\sigma_{B2}$ , МПа | a     | $\sigma_{-1}$ , МПа |
|----------|---------------------|-------|---------------------|
| 1        | 808,5               | 0,318 | 257,0               |
| 2        | 788,4               | 0,328 | 258,0               |
| 3        | 809,6               | 0,317 | 256,0               |
| 4        | 853,4               | 0,303 | 259,0               |

Результаты испытаний на ударную вязкость показаны на рис. 4.

Согласно представленным результатам, ударная вязкость зависит от содержания алюминия в исследуемых сплавах [6].

Результаты определения твердости исследуемых сталей приведены в табл. 3.

Результаты определения пределов выносливости исследуемых сталей приведены в табл. 4.

### Выводы

Анализ полученных в результате исследований зависимостей показывает следующее.

Наиболее высокая прочность ( $\sigma_B = 853,42$  МПа) наблюдается у исследуемых сплавов с наибольшим содержанием алюминия. Однако для этих сплавов характерно снижение характеристик пластичности ( $\delta = 19,459\%$ ;  $\varphi = 52,16\%$ ). С другой стороны, наиболее высокая пластичность ( $\delta = 21,622\%$ ;  $\varphi = 69,75\%$ ) наблюдается у сплава № 2, который, в свою очередь, характеризуется самой низкой прочностью ( $\sigma_B = 788,35$  МПа).

Интегральный показатель механических характеристик, а именно работа разрушения, имеет максимальное значение для сплава с содержанием алюминия 0,062%. Поэтому данное содержание алюминия можно считать оптимальным с точки зрения обеспечения максимальных показателей ударной вязкости. При увеличении или уменьшении содержания алюминия по сравнению с вышеупомянутым значением ударная вязкость снижается. Возможно, что снижение ударной вязкости при увеличении содержания алюминия объясняется наличием химических соединений алюминия с другими легирующими элементами исследуемых сплавов, например,  $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{NaAl}$  и др. Наблюдается увеличение ударной вязкости для сплава № 2 и снижение данного параметра для сплавов № 3 и 4. Данная зависимость может объясняться тем, что для сплава № 2 повышение пластичности имеет преобладающее значение для увеличения работы разрушения, чем снижение прочности. Для сплавов № 3 и 4 снижение характеристик пластичности в большей степени повлияло на работу разрушения по сравнению с повышением прочности.

Результаты определения твердости исследуемых сталей качественно согласуются с характером изменения прочности.

Изменение содержания алюминия в рассматриваемых пределах на выносливость сталей практически не влияет, в отличие от некоторых других механических характеристик, рассмотренных в данной работе ( $\sigma_B$ ,  $\varphi$ ).

### Список литературы

1. ГОСТ 1497-84 Металлы. Методы испытаний на растяжение. – М.: Стандартинформ, 2008.
2. ГОСТ 25.506-85 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Стандартинформ, 2003.
3. ГОСТ 977-88 Отливки стальные. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2005.
4. Захарова Е.Г. Влияние алюминия на механизмы деформации, деформационное упрочнение и разрушение высокопрочных монокристаллов стали Гадфильда: Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. – Томск, 2005.
5. Металлы и сплавы: Справ. – СПб: НПО «Профессионал», 2003. – 1066 с.
6. Науменко В.В. Влияние азота и кремния на механические и коррозионные свойства низкоуглеродистой аустенитной стали для применения в сильноокислительных средах: Автореф. дис. канд. техн. наук. – М., 2012.
7. Самойлов Н.С., Самойлов А.Н. Ускоренные методы определения выносливости и термостойкости. – СПб.: НПО «Профессионал», 2012. – 324 с.
8. Шкатов В.В. Моделирование фазовых и структурных превращений при термической обработке проката из раскисленных алюминием низкоуглеродистых сталей: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Липецк, 2007.

### References

1. GOST 1497-84 Metally. Metody ispytaniy na rastyazhenie. M.: Standartinform, 2008.
2. GOST 25.506-85 Raschety i ispytaniya na prochnost. Metody mekhanicheskikh ispytaniy metallov. Opredelenie harakteristik treshinostojkosti (vyazkosti razrusheniya) pri staticheskom nagruzhении. M.: Standartinform, 2003.
3. GOST 977-88 Otlivki stalnie. Obshie tehnicheckie usloviya. M.: Standartinform, 2005.
4. Zaharova E.G. Vliyanie aluminija na mehanizmy deformatsii, deformatsionnoe uprochnenie i razrushenie vysokoprochnykh monokristallov stali Gadfilda: Avtoref. diss. kand. fiz.-mat. nauk. Tomsk, 2005.
5. Metally i splavy: Sprav. SPb.: NPO «Professional», 2003. 1066 p.
6. Naumenko V.V. Vliyanie azota i kremniya na mekhanicheskie i korrozionnye svoystva nizkouglerodistoy austenitnoj stali dlya primeneniya v silnoookislitelnykh sredakh: Avtoref. diss. kand. tehn. nauk. M., 2012.
7. Samoilov N.S., Samoilov A.N. Uskorennye metody opredeleniya vynoslivosti i termostojkosti. SPb.: NPO «Professional», 2012. 324 p.
8. Shkatov V.V. Modelirovanie fazovykh i strukturnykh prevrashenij pri termicheskoj obrabotke prokata iz raskislennykh aluminie nizmouglerodistykh stalej: Avtoref. diss. kand. tehn. nauk. Lipetsk, 2007.

### Рецензенты:

Козлов В.В., д.т.н., профессор, профессор кафедры ФГКВОУ ВПО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны РФ, г. Санкт-Петербург;

Садин Д.В., д.т.н., профессор, профессор кафедры ФГКВОУ ВПО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны РФ, г. Санкт-Петербург.