

УДК 669.017

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
СТАЛИ 45 НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
КРИТЕРИЕВ СИНЕРГЕТИКИ**

Жуков О. М., магистрант гр. МТМ-23, I курс
Научный руководитель: Жуков А. А., к.т.н., профессор
Рыбинский государственный авиационный технический университет
имени П. А. Соловьева
г. Рыбинск

В настоящее время для оценки работоспособности материалов используются стандартные показатели прочности, пластичности, ударной вязкости и предела текучести. Наибольшее распространение нашли характеристики, которые определяются при испытании материалов на разрыв – предел прочности (σ_B), условный предел текучести ($\sigma_{0.2}$), относительное удлинение (δ), относительное сужение (ψ) и модуль упругости (E).

Испытания на растяжения необходимо проводить согласно рекомендациям ГОСТ 1497-84, в котором приведена методика обработки диаграммы растяжения.

В работах [1-3] отмечается, что работоспособность изделий обусловлена конструкционной прочностью материала, которая определяется не одной из перечисленных выше характеристик, а их совместным синергетическим влиянием. В качестве показателей конструкционной прочности рекомендуется использовать ударную вязкость (K_{CU}), предел усталости (σ_{-1}), трещиностойкость (K_{IC}).

Кроме этого в работах [1, 4] предлагается оценивать работоспособность материала совместным синергетическим влиянием прочностных и пластических свойств получаемых при испытании на растяжение. Используя эти свойства, В. А. Скуднов предложил синергетические критерии разрушения.

Требуемые прочностные и деформационные свойства обеспечиваются соответствующими способами термической обработки: закалка, низкий, средний и высокий отпуск.

В данной работе впервые исследовано влияние перечисленных видов термической обработки на критерии синергетики стали 45. В справочнике [5, с. 272 табл. 30.5] приведены значения механических свойств, показателей пластичности и ударной вязкости после различных видов термической обработки. Для выполнения исследований по влиянию закалки и последующего отпуска на свойства стали 45 исходные данные приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные [5]

Вариант термической обработки	σ_B , МПа	σ_{02} , МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, МДж/м ²
1) Закалка при 830-850 °С	1500-1700	1350-1500	0,9-2,0	6-10	0,15-0,20
2) Закалка при 830-850 °С с отпуском при 250 °С	1400-1700	1250-1500	3,0-4,0	15-20	0,25-0,40
3) Закалка при 830-850 °С с отпуском при 450 °С	950-1160	800-1000	6,0-8,0	45-55	0,7-0,9
3) Закалка при 830-850 °С с отпуском при 650 °С	750-850	600-700	15-16	63-67	1,4-1,6

Согласно работе [4], расчеты критериев синергетики выполнялись по следующим формулам:

1. Критерий энергоемкости.

$$W = 0,5 \cdot (\sigma_{02} + \sigma_B) \cdot \varepsilon_{np}, \quad (1)$$

где ε_{np} – предельная деформация материала при растяжении.

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{(1 - \delta) \cdot (1 - \psi)} \quad (2)$$

2. Критерий зарождения трещин.

$$K_{3.T.} = \frac{W}{\sigma_{02}} \quad (3)$$

3. Критерий распространения трещин.

$$K_{P.T.} = \sigma_{02} \cdot W_{KP}, \quad (4)$$

где $W_{кр}$ – критическое значение энергоемкости:

$$W_{кр} = 0,75 \cdot W \quad (5)$$

4. Критерий хрупкого разрушения.

$$K_{х.р.} = \frac{K_{р.т.}^2}{K_{з.т.} \cdot \sigma_{02}} \quad (6)$$

Результаты расчетов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчетов

Критерий	Термическая обработка			
	1) Закалка	2) Закалка + низкий от- пуск	3) Закалка + средний отпуск	4) Закалка + высокий от- пуск
Критерий энер- гоемкости (W), МДж/м ³	1664	1901	2151	2436
Критерий заро- ждения трещин ($K_{з.т.}$)	1,168	1,383	2,39	3,748
Критерий рас- пространения трещин ($K_{р.т.}$)	$1,8 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	$1,5 \cdot 10^6$	$1,2 \cdot 10^6$
Критерий хруп- кого разрушения ($K_{х.р.}$)	$1,9 \cdot 10^9$	$3,6 \cdot 10^9$	$9,8 \cdot 10^8$	$5,8 \cdot 10^8$

Анализ приведенных данных показывает, что после закалки с высоким отпуском критерий энергоемкости, по сравнению с закалкой без отпуска, увеличивается на 46%. Критерий зарождения трещин возрастает на 220%. Критерий распространения трещин после закалки с высоким и средним отпуском снижается на 40%, что обусловлено существенным повышением пластических свойств (δ и ψ) в результате формирования перлитно-ферритной структуры, в которой скорость распространения трещин снижается. Критерий хрупкого разрушения в результате высокого отпуска существенно снижается на 69%, а после среднего отпуска – на 48%. Низкий отпуск не существенно влияет на хрупкость разрушения.

Результаты выполненного анализа согласуются с основными положениями физики прочности и пластичности физики твердого тела для углеродистых сталей.

Так как ударная вязкость является одной из характеристик работоспособности материалов, поэтому представляет интерес выявить взаимосвязь между критериями синергетики разрушения и ударной вязкостью. С этой целью построена матрица взаимосвязей, представленная в таблице 3.

Таблица 3 – Матрица взаимосвязи критериев синергетики разрушения и ударной вязкости

$K_{Х.Р.}$	$1,9 \cdot 10^9$	$3,6 \cdot 10^9$	$9,8 \cdot 10^8$	$5,8 \cdot 10^8$
$K_{Р.Т.}$	$1,8 \cdot 10^6$	$2,6 \cdot 10^6$	$1,5 \cdot 10^6$	$1,2 \cdot 10^6$
$K_{З.Т.}$	1,168	1,383	2,39	3,748
W	1664	1901	2151	2436
KCU	0,175	0,325	0,8	1,5
Вариант термической обработки	1	2	3	4

Анализ приведенных значений показывает, что ударная вязкость повышается на 86%, после среднего и высокого отпуска повышается в 3,6 и 7,6 раза соответственно.

Результаты количественной оценки взаимосвязи показывают, что существенное влияние на повышение ударной вязкости после среднего и высокого отпуска оказывают: критерий энергоемкости (W), критерий зарождения трещин ($K_{З.Т.}$) и критерий хрупкого разрушения ($K_{Х.Р.}$).

Выводы по выполненной работе:

1. Показана возможность использования критериев синергетики для оценки ударной вязкости, т.е. по результатам испытаний на растяжение можно прогнозировать значение ударной вязкости стали 45 без проведения специальных испытаний на ударную вязкость.
2. Дано физическое обоснование обратно пропорциональной взаимосвязи критерия распространения трещины ($K_{Р.Т.}$) и ударной вязкости.
3. Впервые выполнены расчеты синергетических критериев разрушения (показателей работоспособности) стали 45 после закалки и закалки с последующими отпусками: низким, средним и высоким.
4. Данная работа может являться методикой для проведения аналогичных исследований для легированных сталей.
5. Для более достоверной количественной оценки критериев синергетики на ударную вязкость стали 45 целесообразно выполнить корреляционный и регрессионный анализ, в результате которого можно получить регрессионное уравнение с учетом совместного влияния критериев синергетики на ударную вязкость.

Список литературы:

1. Тушинский, Л.И. Теория и технология упрочнения металлических сплавов [Текст] / Л.И. Тушинский. – Новосибирск. Наука. Сиб. Отделение, 1990. – 306 с.

2. **Приходько, В.М. Металлофизические основы разработки упрочняющих технологий** [Текст] / В.М. Приходько, Л.Г. Петрова, О.В. Чудина. М: Машиностроение, 2003. 384 с., ил.

3. **Гольдштейн, М.И. Металлофизика высокопрочных сплавов** [Текст]: учебное пособие для вузов / М.И. Гольдштейн, В.С. Литвинов, Б.М. Бронфин. М.: Металлургия, 1986. 312 с.

3. **Скуднов, В.А. Синергетика явлений и процессов в металловедении, упрочняющих технологиях и разрушении** [Текст]: учеб. пособие для студентов вузов / В.А. Суднов; НГТУ. – Нижний Новгород, 2007. – 191 с.

4. **Бернштейн, М.Л. Металловедение и термическая обработка стали** [Текст]: справ. изд. – 3-е изд., перераб. и доп. В 3-х т. Т. I. Методы испытаний и исследований / Под ред. М.Л. Бернштейна, А.Г. Рахштадта. М.: Металлургия, 1983. 352 с.