

# ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ НЕКОТОРЫХ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ВЯЗКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ДЛЯ ВЫБОРА ШТАМПОВЫХ СТАЛЕЙ

И. АРТИНГЕР

кафедра Механической Технологии Будапештского Технического Университета

(Поступила 22. XI. 1970 г.)

Представлено проф. д-р Л. Жильмо

## Введение

Расчет инструмента для высокоскоростной объемной штамповки требует знания прочностных характеристик штамповых сталей при статическом и динамическом нагружении, а также и характеристики, связанной вязкостью разрушения, т. е. при определенной величине которых возможно предупредить хрупкое разрушение материалов штампов [1]. Стремления повысить предел текучести штамповых сталей выше 140—150 кг/мм<sup>2</sup> в условиях сложного напряженного состояния, где самораспространение трещины является лимитирующим процессом разрушения, также требуют знания такой характеристики материала, как «вязкость разрушения» для обеспечения достаточной вязкости высокопрочного металла.

## Меры вязкости штамповых сталей

Существует множество методов испытаний, определяющих сопротивление стали хрупкому разрушению [2—4].

За меру вязкости штамповых сталей в работе [1] принималась удельная работа предельной деформации при растяжении

$$w = \int \sigma' d\lambda \quad \text{мкг/см}^3$$

где:  $\sigma'$  — истинное напряжение;

$\lambda$  — истинное удлинение;

По нашим исследованиям [5] величины предела текучести ( $\sigma_{0,2}$  кг/мм<sup>2</sup>), а также удельной работы предельной деформации штамповых сталей при растяжении в зависимости от структуры, т. е. от температуры и времени отпуска стали изменяются. За оптимальную температуру и время отпуска следует принимать те параметры отпуска, при которых обе эти характеристики имеют максимальное значение, кроме того, величина удельной работы только немного изменяется в зависимости от скорости деформирования и от концентрации напряжений (от коэффициента формы,  $\alpha_n$ ) при различных

температурах испытаний [1]. На основании этих соображений выбрали параметры термической обработки инструментов для высокоскоростной объемной штамповки по экспериментально определяемым кривым отпуска штамповых сталей [5]. Штампы и их элементы работают без разрушения. Поломок еще не было.

Вязкость разрушения сталей ( $G_{Ic}$  ммкг/мм<sup>2</sup>) характеризует энергию, затрачиваемую при увеличении трещины на единицу длины, т. е. способность стали сопротивляться распространению трещины [3, 6]. Она как и любая характеристика стали (как например  $\sigma_{0,2}$ ) кроме внешних факторов (температура, скорость деформирования) зависит от природы, структурного состояния, чистоты и т. д. материала. Знание зависимости вязкости разрушения от состава, технологии выплавки, структуры, содержания вредных примесей имеет громадную важность и при выборе материалов инструментов для высокоскоростной объемной штамповки.

В условиях плоско-напряженного состояния вязкость разрушения ( $G_{Ic}$ ) зависит от так называемого коэффициента интенсивности напряжений ( $K_{Ic}$ ) и от модуля упругости ( $E$ ) [6]

$$G_{Ic} = \frac{K_{Ic}^2}{E}$$

Коэффициент интенсивности напряжений характеризует меру возрастания напряжения в устье трещины, определяемого совместным влиянием величины нагрузки, размеров тела и трещины. Расчетные зависимости  $K_{Ic}$  от размеров образца и трещины для различных условий рекомендуемых испытаний собраны в работах [7—11].

### Исследуемые материалы и методы испытаний

Из множества различных методов испытаний для сравнения разных штамповых сталей (таблица № 1) в различном структурном состоянии в наших исследованиях, проведенных в лабораториях Кафедры Механической Технологии, применялись следующие.\*

а) метод Гуляева [3, 4, 12], основанный на идее, что значения работы распространения трещины ( $a_p$ ) не зависят от радиуса надреза образца при ударном изгибе. Значения ударной вязкости определяются для двух радиусов надреза ( $R = 1,00$  мм и  $R = 0,25$  мм), а прямая  $A_k = f(R)$  экстраполируется до пересечения ее с ординатной осью и получится значение  $a_p$  при  $R = 0$ , т. е. при острой трещине.

\* В проведении испытаний участвовали ассистент П. Ньюлас и дипломант Й. Ченгери.

б) метод Дроздовского [4, 13—14] и Орнера—Хартбовера [4, 15], основанный на определении ударной вязкости образцов с усталостной трещиной, т. е.  $a_p = W/A$  мкг/см<sup>2</sup>. Усталостная трещина глубиной 1—1,5 мм создавалась на образце радиусом закругления  $R = 0,25$  мм на вибраторе.

в) метод регистрации диаграмм деформации и расчет  $K_{Ic}$  при испытании образцов с усталостной трещиной на ударный изгиб [4, 7—11]. Регистрацию

Таблица 1

Сталь	C%	Si%	Mn%	Cr%	Mo%	V%	W%	Ni%	S%	P%	O <sub>2</sub> ppm	N <sub>2</sub> ppm
А	0,34	1,20	0,44	5,0	1,22	1,1			0,023	0,027		
Б	0,28	0,35	0,26	2,55	2,55	0,60	0,50	0,32	0,014	0,010		
В	0,27	0,24	0,29	2,40	0,28	0,32	4,2		0,017	0,028		
Г	0,28	0,17	0,25	2,36	0,10	0,35	4,30		0,007	0,025	44	72*
Д	0,36	0,24	0,68	0,98	0,24			1,03	0,010	0,015		
Е	0,46	0,34	0,59	0,70	0,31			1,65	0,014	0,020		

\* Сталь электрошлакового переплава Исследовательского Отделения Csepel Acélmű.

силы удара провели по методу [16]. Разрушающая нагрузка  $P$ , входящая в формулу для определения  $K_{Ic}$ , определялась по диаграмме деформации.

$$K_{Ic} = y \frac{6 \cdot P/2 \cdot l/2 \cdot \sqrt{a}}{B \cdot W^2}$$

$$y = 1,93 - 3,87 \frac{a}{W} + 14,53 \left( \frac{a}{W} \right)^2 - 25,11 \left( \frac{a}{W} \right)^3 + \dots$$

где:  $l$  — расстояние между опорами,

$a$  — глубина трещины,

$B$  — толщина образца,

$W$  — ширина образца.

г) статическое растяжение цилиндрических образцов с острым ( $R \leq 0,025$  мм) надрезом при отношении  $d/D = 0,667$  (где:  $d$  — диаметр в надрезе,  $D$  — наружный диаметр образца), обеспечивающее максимально возможную концентрацию напряжений [3, 17] на машине Инстрон. Надрез создали острым точечным резцом из твердого сплава  $KQ$ .

Значение  $K_{Ic}$  рассчитывается по формуле [17]:

$$K_{Ic} \approx 0,414 \cdot \sigma_N \cdot \sqrt{D},$$

где:  $\sigma_N$  — номинальное напряжение разрушения,

$D$  — наружный диаметр образца,  
а также по формуле [9]:

$$K_{Ic} = y \frac{P}{D^{3/2}},$$

где:

$$y = 1,72 \frac{D}{d} - 1,27, \text{ при } d/D = 0,5 - 0,8$$

$P$  — максимальная нагрузка.

д) метод определения вязкости разрушения по данным испытания образцов на усталость [3, 18], где не требуется наносить острых надрезов на образец. При амплитудах напряжений, соответствующих области чистой усталости трещина распространяется в условиях плоской деформации. Критическая длина трещины легко определяется на поверхности излома по длине усталостного пятна. Значение  $K_{Ic}$  для цилиндрических образцов определяется по формуле:

$$K_{Ic} = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot l_{Ic}}$$

где:  $\sigma$  — амплитуда циклического нагружения,  
 $l_{Ic}$  — размер усталостной трещины.

### Результаты исследований

Значения вязкости разрушения и  $K_{Ic}$ , определяемые различными методами, а также значения ударной вязкости, работы зарождения и распространения трещины с указанием значения предела текучести, удельной работы предельной деформации и вида термообработки для сталей А, Б собраны в таблице № 2. В таблице № 2 и 3 указаны усредненные результаты 3—5 испытаний.

Для других сталей значение вязкости разрушения (Таблица № 3) определялось только по методу статического растяжения цилиндрических образцов с острым надрезом ( $R = 0,025$  мм), как наиболее чувствительному структурным изменениям и чистоте сталей при практически одинаковом значении предела текучести ( $\sigma_{0,2} \approx 150$  кг/мм<sup>2</sup>).

Методы определения вязкости разрушения, основанные на измерении энергии удара ( $KCU$ ,  $KCV$ ,  $a_3$ ,  $a_p$ ) из-за малости и погрешности измеряемой величины не могут быть рекомендованы для характеристики вязкости штамповых сталей.

Остальные методы определения вязкости разрушения ( $W_c$ , в, г, д) очень чувствительно реагируют на изменение структурного состояния и

содержания вредных примесей ( $S$ ,  $P$ ) стали, хотя дают количественно различные друг от друга значения вязкости разрушения. Вязкость разрушения, определяемая при динамическом испытании всегда меньше, чем при стати-

Таблица 2

Сталь	Отпуск	$\sigma_{0,2}$	$W_c$	Ударный изгиб		
		кг/мм <sup>2</sup>	мкг/см <sup>3</sup>	KCU мкг/см <sup>2</sup>	KCV мкг/см <sup>2</sup>	$a_{зарожд.}$ мкг/см <sup>2</sup>
А	Ауст. 1040° С 1ч					
	520° С 10 ч	168	26	3,0	0,82	2,90
	520° С 24 ч	151	160	3,3	0,89	3,2
	580° С 1,5 ч	150	152	3,5	1,06	3,25
	600° С 1 ч	142	140	2,5	1,04	2,0
	Ауст. 1070° С 2 ч					
	520° С 24 ч					
Б	600° С 1 ч					
	Ауст. 1040° С 1 ч					
	520° С 3 ч	152	103	4,2	1,10	4,1
	520° С 12 ч	150	160	4,4	1,27	4,15
	580° С 3 ч	155	166	4,3	1,25	4,05
	600° С 1 ч	150	180	3,6	1,37	3,0

Ударный изгиб		Статическое растяжение					Усталостные испытания
$a_p$ Гуляев мкг/см <sup>2</sup>	$a_p = \frac{W}{A}$ мкг/см <sup>2</sup>	$G_{Ic}$ Ирвин мкг/см <sup>2</sup>	$K_{Ic}$ Ирвин кг/мм <sup>3/2</sup>	$K_{Ic} = \frac{K_{Ic}}{D} = 0,414 \sigma \sqrt{D}$ кг/мм <sup>3/2</sup>	$K_{Ic} = \nu \frac{P_{max}}{D^{3/2}}$ кг/мм <sup>3/2</sup>	$G_{Ic}$ кг/см <sup>2</sup>	$K_{Ic} = \sigma \sqrt{\pi l_{cr}}$ кг/мм <sup>3/2</sup>
0,10	0,50	0,042	94	141	152	0,11	156
0,10	0,60	0,059	112	185	203	0,20	236
0,25	0,51	0,051	104	191	210	0,21	256
0,42	0,47	0,052	105	206	228	0,24	270
				108	123	0,072	
				130	147	0,102	
0,08	0,66	0,058	111	129	142	0,096	175
0,25	0,70	0,116	153	158	173	0,142	211
0,25	0,79	0,115	152	150	165	0,130	224
0,62	0,60	0,126	163	159	167	0,132	218

ческим, хотя стали не одинаково реагируют на скорость деформирования (смотри данные сталей А, Б в таблице № 2).

Для полной оценки вязкости штамповых сталей необходимо знание вязкости разрушения ( $K_{Ic}$ ) как при статическом, так и при динамическом нагружении. Эти испытания требуют меньшее количество образцов и времени, чем определение зависимостей удельной работы предельной деформации от скорости нагружения и от коэффициента формы.

Таблица 3

Сталь	Отпуск	$\sigma_{0,2}$ кг/мм <sup>2</sup>	$N$ мкг/см <sup>2</sup>	$K_{Ic}=0,414\sigma\sqrt{D}$ кг/мм <sup>3/2</sup>	$K_{Ic}=\gamma\frac{P_{МА^{1/2}}}{D^{3/2}}$ кг/мм <sup>3/2</sup>	$G_{Ic}$ мкг/см <sup>2</sup>
В	Ауст. 1040° С 1 ч					
	520° С 3 ч	152	90	184	207	0,204
	520° С 10 ч	151,5	144	196	224	0,238
	580° С 1 ч	148	151	186	208	0,205
	580° С 10 ч	146	165	178	200	0,190
	620° С 1 ч	144	175	184	207	0,204
	640° С 1 ч	132	128	187	211	0,212
Г	Ауст. 1040° С 1 ч					
	520° С 3 ч	150		197	223	0,237
	520° С 10 ч	150		205	230	0,252
	520° С 24 ч	145	148	226	257	0,314
	580° С 1 ч	150	150	204	232	0,256
	580° С 10 ч	147		202	228	0,248
	620° С 1 ч	153	160	204	228	0,248
	—			162	184	0,161
	Ауст. 1080° С 1 ч					
	520° С 3 ч			204	230	0,252
	520° С 10 ч	144	160	220	249	0,295
	520° С 24 ч	147	182	225	255	0,310
	580° С 1 ч	147	230	220	248	0,294
	580° С 10 ч	137	186	206	236	0,266
	620° С 1 ч	135	220	223	253	0,305
	520° С 10 ч					
	+	580° С 1 ч			218	247
—		134	122	195	223	0,236
Д	Ауст. 840° С 1 ч					
	—	156	80	225	254	0,307
	400° С 3 ч	141	140	240	272	0,352
Е	Ауст. 840° С 1 ч					
	520° С 5 ч	135	70	214	242	0,279
	580° С 1 ч	124	100	230	258	0,317

## Резюме

В данной работе рассматривался вопрос возможности применения некоторых современных методов оценки вязкости разрушения для выбора наиболее вязкого состояния высокопрочных штамповых сталей для высокоскоростной объемной штамповки.

Экспериментально установлено, что чувствительной мерой вязкости высокопрочных сталей, кроме удельной работы предельной деформации, может служить вязкость разрушения, определяемая при статическом растяжении цилиндрических образцов с острым надрезом ( $R \leq 0,025$  мм), и при ударном изгибе образцов с трещиной с записью диаграммы деформации. Данные испытания гладких образцов на усталость из штамповых сталей также дают возможность определения вязкости разрушения. Этот метод тоже чувствительно реагирует на изменение структуры и чистоты (понижения содержания примесей) сталей.

## Литература

1. ГИЛЛОТ, L.: *Métallurgie et. constr. méc.* 6—7, 333—340, 324 (1969).
2. Гуляев, А. П.: *Заводская Лаб.* 1, 88—94 (1965).
3. Иванова, В. С.: *Усталость и хрупкость металлических материалов.* 1968. 49—72.

4. ARTINGER, I., CZOBOLY, E.: *Gép* **12**, 464—471 (1970).
5. ARTINGER, I.: *Bányászati és Kohászati Lapok — Kohászat* **4**, 159—163 (1970).
6. IRWIN, G. R.: *J. Appl. Mech.* **361—364** (1957).
7. IRWIN, G. R., SRAWLEY, I. E.: *Materialprüfung* **1**, 1—11 (1962).
8. BROWN, W. F., SRAWLEY, I. E.: *Fracture toughness testing and its applications*. NASA-ASTM 1965.
9. BROWN, W. F., SRAWLEY, I. E.: *ASTM. Spec. Techn. Publ.* 410. Dec. 1967.
10. BERRY, B. W.: *Fracture toughness*. JISI Publ. 121 1968.
11. Черепанов, Г. П., Каплун, А. Б., Карасев, Л. П., Кутенова, Л. И.: *Физико-хим. механика материалов* **1**, 64—68 (1970).
12. Гуляев, А. П.: *Заводская Лаб.* **4**, 473—475 (1967).
13. Дроздовский, Б. А., Фридман, Я. Б.: *Заводская Лаб.* **3**, (1959).
14. Дроздовский, Б. А., Фридман, Я. Б.: *Влияние трещины на механические свойства конструкционных сталей*. Металлургиздат. 1960.
15. ORNER, G. M., HARTBOWER, C. E.: *Welding Journ.* **9**, 405—416 (1961).
16. KONKOLY, T., NYULÁSZ, P.: *Anyagvizsgáló Kongresszus Budapest* 241—244 (1970).
17. WESTERGAARD, H.: *Material Research and Standards* **3**, 196—203 (1962).
18. Иванова, В. С., Кудряшов, В. Г.: *Проблемы прочности.* **3**, 17—19 (1970).

Dr. István ARTINGER, Budapest XI., Bertalan Lajos u. 7, Венгрия.