

## ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПЕРЕПЛАВОК И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНЫХ ШТАМПОВЫХ СТАЛЕЙ

И. АРТИНГЕР

Кафедра Механической Технологии Будапештского Технического Университета

### Введение

Во время исследований, проведенных на кафедре под руководством Л. Жильмо с целью разработки технологии высокоскоростной объемной штамповки было необходимо также выбрать материал и термообработку инструментов, подвергаемых большим статическим и динамическим нагрузкам. Технология высокопрочной объемной штамповки ставит серьезные требования к штамповым сталям, так например: предел текучести, выше обычного ( $\sigma_{0,2} > 150$  кг/мм<sup>2</sup>), износостойкость, сопротивление термической усталости, теплостойкость, вязкость, обеспечивающая достаточную надежность против хрупкого разрушения, которому способствуют концентраторы напряжения в штампах и высокая скорость деформации. Дальнейшее повышение твердости, прочности, износостойкости штамповых сталей без потери вязкости и снижения сопротивления термической усталости кажется возможным с повышением чистоты сталей путем переплавок в вакууме и под шлаком.

### Исследуемые штамповые стали

Ранее проведенные исследования [1—4] показали, что из множества исследованных сталей для вышеуказанной цели больше всего подходят стали марки W3, K13, K14 (таблица № 1) при определенном соотношении предела текучести и вязкости, которое довольно легко регулируется параметрами термообработки (температурой и временем аустенитизации и отпуска). Количество вредных примесей O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, S, P в стали, полученной открытым электродуговым способом (ОЭД) может быть снижено путем электрошлаковой (ЭШП), вакуумдуговой (ВДП) и электроннолучевой (ЭЛП) переплавки (таблица № 2). Применяемые переплавки в значительной мере снижают также количество неметаллических включений в стали и уменьшают их размеры (таблица № 3). В проведении переплавок большую помощь нам оказали Исследовательский отдел Csepel Acélmű, Csepel Fémmű и Лаборатория Испыта-

Таблица 1

Марка стали	C %	Si %	Mn %	Cr %	W %	V %	Mo %
W3	0,30	0,30	0,3	2,5	4,5	0,3	0,3
K13	0,36	0,96	0,4	5,0	—	1,1	1,2
K14	0,28	0,35	0,25	2,5	0,5	0,6	2,5

Таблица 2

Марка стали	Способ плавки стали	Si %	S %	P %	Cu %	O <sub>2</sub> ppm	N <sub>2</sub> ppm	H <sub>2</sub> ppm
W3	ОЭД	0,30	0,017	0,028	0,28	70	75	1,0
	ЭШП	0,12	0,007	0,025	0,20	44	72	0,6
	ЭЛП	0,22	0,014	0,022	0,12	31	41	0,5
	ВДП	0,30	0,016	0,028	0,18	27	70	0,2
K13	ОЭД	0,96	0,023	0,027	0,22	63	105	2,5
	ЭШП	0,85	0,008	0,029	0,19	50	89	0,3
	ВДП	0,92	0,020	0,026	0,21	36	82	0,4
K14	ОЭД	0,35	0,014	0,010	0,22	75	108	2,0

Таблица 3

Марка стали	Способ плавки стали	Балл неметаллических включений		
		Сульфиды	Оксиды	Силикаты
W3	ОЭД	2/b	2	2/a
	ЭШП	0,5/b	1	0
	ЭЛП	1/b	1	1/a
	ВДП	1,5/b	0,5	1/a
K13	ОЭД	2,5/b	1,5	3/a
	ЭШП	1/a	1	2,5/a
	ВДП	2/b	1	1,5/b
K14	ОЭД	2/b	2	2/a

ния металлов завода Чепель. По ходу исследований температура аустенитизации менялась от 1040°C — до 1120°C, а температура отпуска от 520°C до 640°C с интервалами 30°C; время отпуска: 0,5, 1, 2, 3, 5, 10, 24, 48 и 100 часов было в зависимости от температуры отпуска.

### Параметры вязкости

Для характеристики вязкости (сопротивления к хрупкому разрушению) исследуемых штамповых сталей применяли: А) удельную работу предельной деформации ( $W_c = \text{мкГ/см}^3$ ), определяемую на основании данных при испы-

тании на растяжение гладких цилиндрических образцов [3, 5, 6]; а также Б) «коэффициент интенсивности напряжений» ( $K_{Ic} = \text{кГ/мм}^{3/2}$ ), который находится в определенном соотношении с «вязкостью разрушения» ( $G_{Ic} = \text{ммкГ/мм}^2$ ), характеризующей способность стали сопротивляться распространению трещин [6—8]. Известно, что в процессе хрупкого разрушения самопроизвольное распространение трещин играет решающую роль. Как наши прежние исследования [8] показали, определение «коэффициента интенсивности напряжений» высокопрочных штамповых сталей возможно методом:

а) испытания на растяжение цилиндрических образцов ( $d/D = 0,667$ ) с острым ( $R \leq 0,025$  мм) надрезом

$$K_{Ic_s} = y \frac{P}{D^{3/2}} \quad \text{кГ/мм}^{3/2}, \quad [9]$$

или

$$K_{Ic_s} = 0,414 \sigma \sqrt{D} \quad \text{кГ/мм}^{3/2} \quad [10]$$

б) регистрации диаграмм деформаций при испытании образцов с установившейся трещиной на ударный изгиб [11]

$$K_{Ic_D} = y \frac{M \cdot \sqrt{a}}{B \cdot W^2} \quad \text{кГ/мм}^{3/2}$$

в) измерения длины усталостной трещины ( $I_{Tp}$ ) при испытании гладких цилиндрических образцов на усталость [10, 12]

$$K_{Ic_t} = \sigma \sqrt{\pi \cdot I_{Tp}} \quad \text{кГ/мм}^{3/2}.$$

### Результаты исследований

Из данных таблицы № 2 следует, что в результате электрошлаковой переплавки сталей содержание серы, кислорода, водорода также и кремния в значительной степени понижается. При вакуумдуговой и электроннолучевой переплавки эффект десульфурации меньше, чем при ЭШП, однако степень понижения содержания газов в стали значительно больше. Количество и размеры неметаллических включений в результате применяемых переплавок заметно уменьшаются (таблица № 3).

Такие характеристики механических свойств штамповых сталей, как предел текучести ( $\sigma_{0,2}$ ), удельная работа предельной деформации ( $W_c$ ), «коэффициент интенсивности напряжений» ( $K_{Ic}$ ) очень чувствительны к изменениям микроструктуры стали, вызванным термообработкой и различными переплавками. Для иллюстрации этого изменения свойств из множества данных приве-

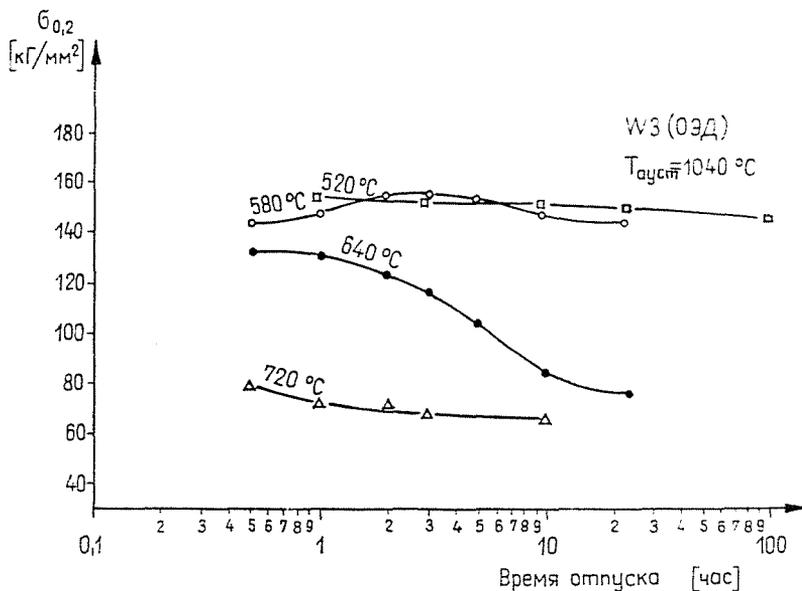


Рис. 1. Изменения предела текучести стали марки W3 в зависимости от температуры и времени отпуска

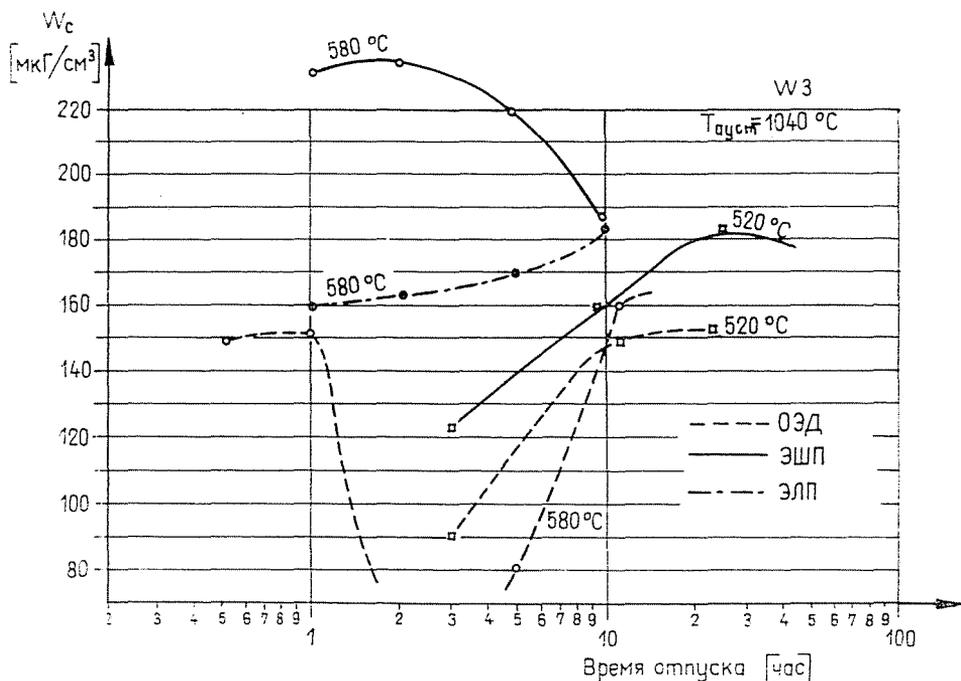


Рис. 2. Изменения удельной работы предельной деформации стали марки W3 после различных переделок в зависимости от температуры и времени отпуска

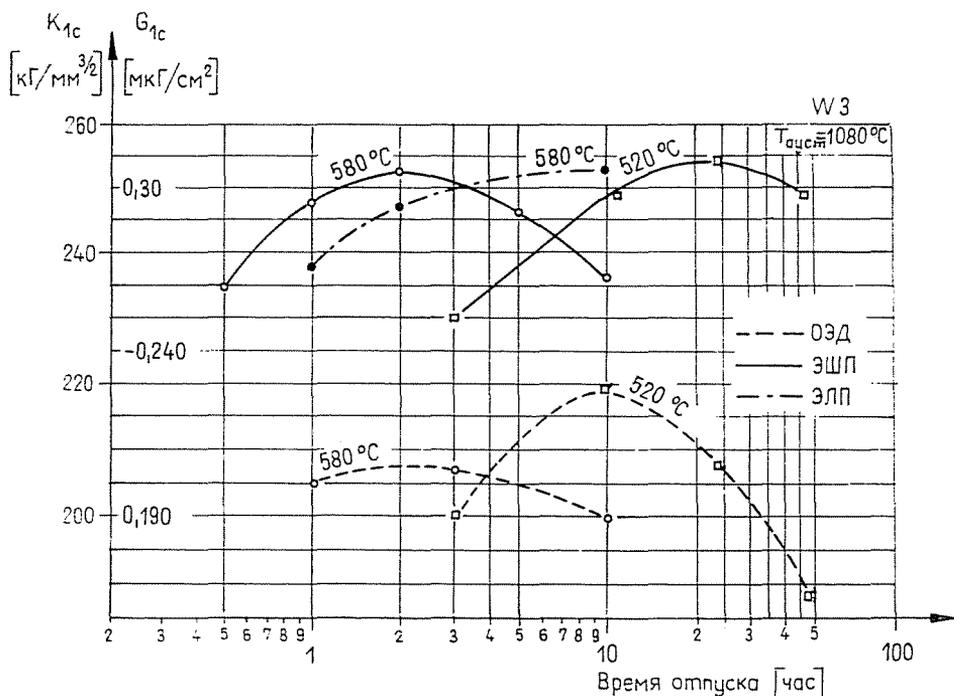


Рис. 3. Изменения «коэффициента интенсивности напряжения» стали марки W3 после различных переплавок в зависимости от температуры и времени отпуска

дем всего лишь три графика (рис. 1—3). Ход кривых изменения  $K_{1c}$  и  $W_c$  для переплавленных сталей одинаков. Как и раньше наблюдалось [4], на кривых  $K_{1c} - \tau$ ,  $W_c - \tau$  имеется максимум. Эти максимумы вязкости стали под влиянием переплавок при данной температуре отпуска находятся при более длительном времени отпуска, чем у сталей открытой плавки. Эти наблюдения совпадают также результатами [13], полученными на сталях ЭЛП. У переплавленных сталей по сравнению с сталью ОЭД не наблюдается интенсивное снижение величин  $W_c$  (охрупчивание) в зависимости от времени отпуска.

Максимальные и минимальные значения параметров вязкости исследования различных сталей, полученные различной термообработкой, собраны в таблице № 4. Величины удельной работы предельной деформации и «вязкости разрушения» переплавленных сталей при одинаковом уровне прочностных характеристик на 25—50% больше, чем у сталей открытой электродуговой плавки. Таким образом, возникает возможность повышения предела текучести, твердости, а также и износостойкости штамповых сталей без снижения уровня вязкости.

На основании данных графиков свойство стали — параметр отпуска для каждой стали возможно выбрать оптимальную комбинацию параметров тер-

Таблица 4

Марка стали	Способ плавки стали	$W_c$ МКГ/СМ <sup>2</sup>		$KIc_S$ КГ/ММ <sup>3/2</sup>		$KIc_D$ КГ/ММ <sup>3/2</sup>		$KIc_T$ КГ/ММ <sup>3/2</sup>	
		макс.	мин.	макс.	мин.	макс.	мин.	макс.	мин.
W3	ОЭД	160	30—0	220	180	70	40	260	208
	ЭШП	235	120	255	220	120		285	260
	ЭЛП	185	125	300	235	100	50		
	ВДП					100	45	290	255
K13	ОЭД	165	90—0	230	130	100	80	256	156
	ЭШП	170	100	250	160	110	85		
	ВДП	195		265	190	110			
K14	ОЭД	155	85—0	175	140	153		224	175

Таблица 5

Марка стали	Способ плавки стали	$\sigma_{0,2}$ КГ/ММ <sup>2</sup>	$W_c$ МКГ/СМ <sup>2</sup>	$KIc_S$ КГ/ММ <sup>3/2</sup>	$T_{ауст}$ °С	$T_{отп.}$ °С	$\tau_{отп.}$ час
W3	ОЭД	145	155	210	1040	580	1
		145	170	220	1040	580	10—24
		147	220	250	1080	580	10
		145	170	260	1080	580	3—5
K13	ОЭД	165	165	205	1040	520	24—36
						580	1—2
	ЭШП	155	160	210	1040	550	5
		160	160	230	1080	520	24
	ВДП	165	170	255	1080	580	3—5
						550	5—10
K14	ОЭД	150	155	210	1060	520	8—12
						580	1—3

Таблица 6

Марка стали	Способ плавки стали	$KIc_D$ КГ/ММ <sup>3/2</sup>			АРТ МКГ/СМ <sup>2</sup>			
		при температуре испытания						
		20°С	200°С	400°С	20°С	200°С	400°С	500°С
W3	ОЭД	40—70	140	140	0,6	2,8	3	6,5
	ЭШП	135	165	150	0,9	3,6	4	9—10
	ЭЛП	70—100	155	160	0,7	2,8	4	9
	ВДП	110	155	130	0,95	2,8	3,2	10,5
K13	ОЭД	65	108		0,6	1,8		3,2
	ЭШП	80—110	140—210		0,7	2,9		7,3
	ВДП	125	160—190		0,65	2,5		5,8

мообработки ( $T$  ауст.,  $T$  отпуска,  $\tau$  отпуска), полученная микроструктура которых обеспечивает максимальную величину «вязкости» и предела текучести (таблица № 5).

Матрицы и пуансоны высокоскоростного молота кафедры Механической технологии, из сталей W3 и K13, термообработанные по указанному методу еще ни разу хрупко не разрушались.

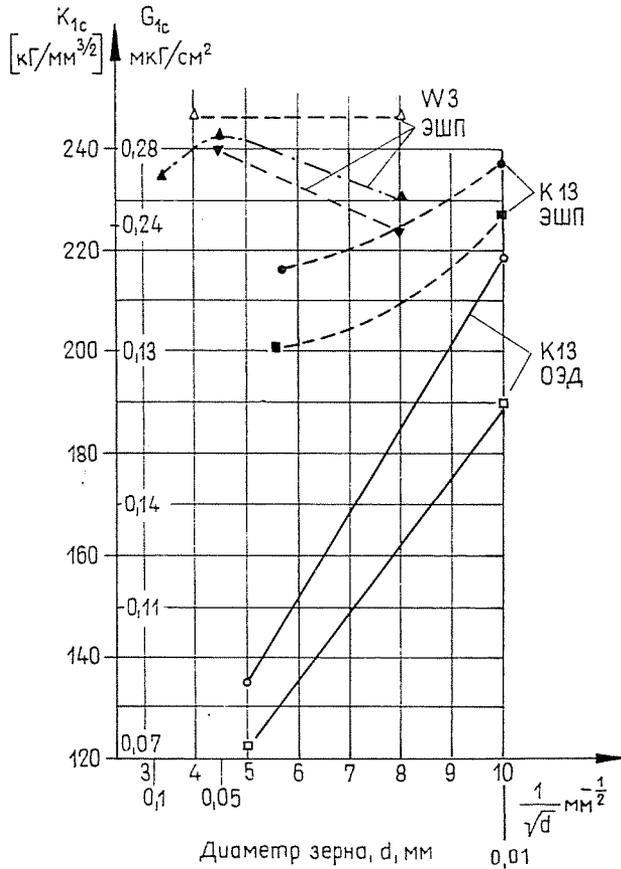


Рис. 4. Изменения  $K_{Ic}$  и  $G_{Ic}$  сталей марок W3 и K13 после различных переплавок и состояний в зависимости от диаметра аустенитного зерна

Величина коэффициента интенсивности напряжения (и вязкости разрушения) штамповых сталей, определяемая при динамических испытаниях ( $K_{IcD}$ ) всегда меньше, чем при статических испытаниях ( $K_{IcS}$ ) (смотри таблицу № 4). Хотя величина  $K_{IcD}$  в результате понижения содержания вредных примесей под влиянием различных передлавок, особенно ЭШП, также увеличивается, т. е. уменьшается чувствительность сталей к скорости деформации.

Эта чувствительность у различных сталей неодинакова, и с ней при выборе стали следует считаться.

Величина коэффициента интенсивности напряжения штамповых сталей, определяемая при циклических испытаниях ( $K_{Ic}$ ) в некоторой степени увеличивается в результате переплавки сталей, т. е. снижения содержания вредных примесей.

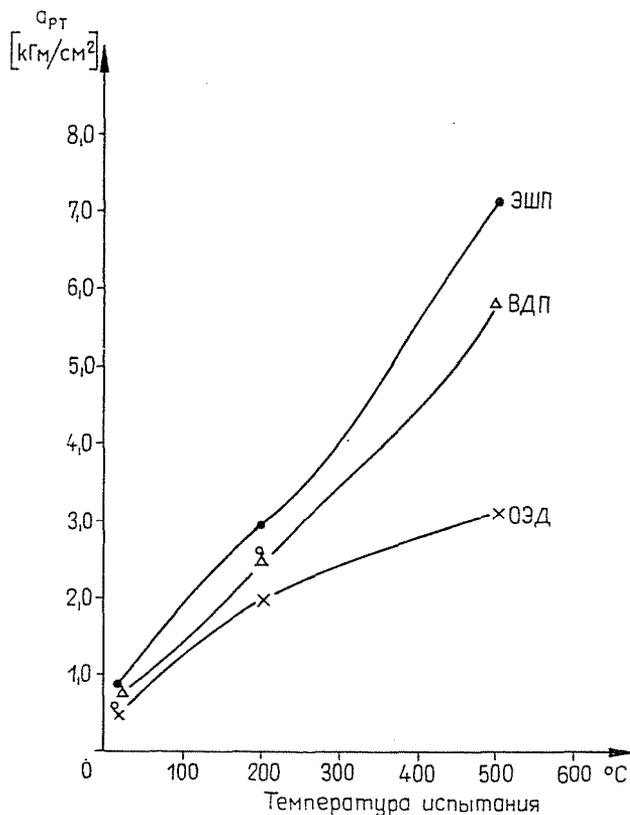


Рис. 5. Изменение работы распространения трещины стали марки К13 после различных переплавок в зависимости от температуры испытания

Вероятность обогащения границ зерен вредными примесями, снижающими поверхностную энергию, когезивную прочность границ зерен при снижении общего количества примесей в стали в результате предплавки (ЭШП, ЭЛП) должна уменьшаться. Так, например, «вязкость разрушения» таких сталей менее чувствительна к увеличению размера аустенитного зерна, чем у сталей нормальной плавки (рис. 4). Изменение вязкости разрушения таких сталей в зависимости от диаметра аустенитного зерна не может быть описано уравнением Petch—Hall. Стали, подвергаемые переплавке, поэтому могут быть закалены с более высокой температуры аустенитизации.

Вязкость разрушения (работа распространения трещин) штамповых сталей с меньшим содержанием вредных примесей (ЭШП, ВДП, ЭЛП), определяемая на образцах с усталостной трещиной методом механики разрушения ( $K_{Iсв}$ ) и отсчетом энергии на маятниковом копре ( $a_{PT} = \frac{G}{F}$  мкГ/см<sup>2</sup>) при повышенных температурах испытания, также значительно лучше, чем у

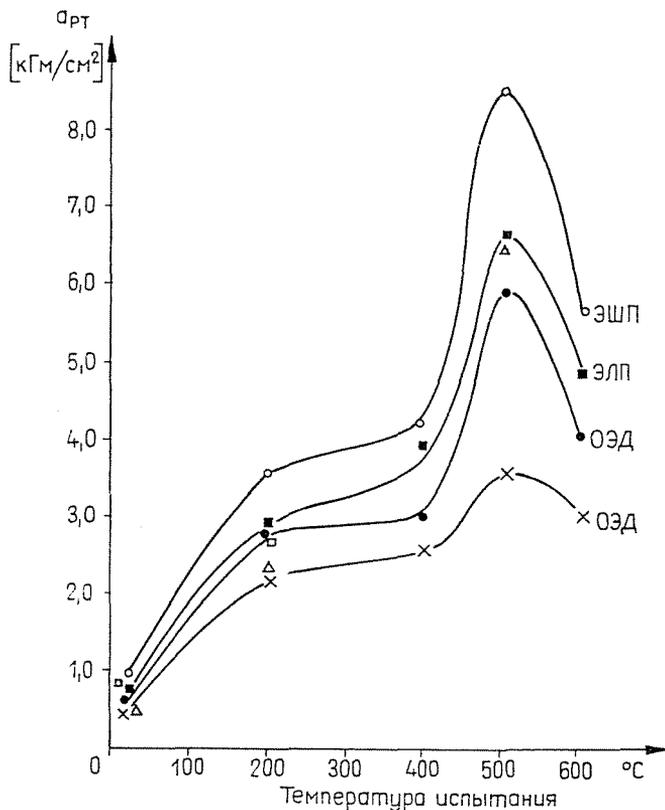


Рис. 6. Изменение работы распространения трещины стали марки W3 после различных переплавок в зависимости от температуры испытания

сталей открытой плавки (таблица № 6 и рис. 5—6). При температурах испытания выше 400°C условия механики разрушения уже не соблюдаются, характер разрушения сталей становится полностью вязким. Этим должен объясняться и 5—50-кратное увеличение срока службы матриц и оправок при горячей прессовке медных сплавов, изготовленных из стали W3, переплавленной ЭЛП (опыт Csepel Fémml) [13]. Стали ЭШП типа W3, имеющие «вязкость разрушения» больше открытой выплавки, характеризуются также в 5—6 раз большим сопротивлением термической усталости [14].

## Резюме

В данной работе рассматривалось влияние различных переплавок (электрошлаковой ЭШП, вакуумдуговой ВДП, электроннолучевой ЭЛП) и термообработки на механические свойства ( $\sigma_{0,2}$ ,  $W_c$ ,  $K_{Ic}$ ) высокопрочных штамповых сталей, которые могут быть применены и для инструментов высокоскоростной объемной штамповки.

Влияние переплавок, уменьшающих количество вредных примесей в стали, особенно ЭШП и ЭЛП, на вязкость исследованных штамповых сталей положительное при статических, динамических и циклических испытаниях, а также при повышенных температурах испытания (эксплуатации). Оказывается возможным увеличение предела текучести (твердости) переплавленных сталей путем термообработки без снижения уровня вязкости стали.

Вязкость штамповых сталей, содержащих меньше количество вредных примесей мало чувствительна укрупнению аустенитного зерна.

Статическая, циклическая и динамическая «вязкость разрушения», а также и удельная работа предельной деформации сплавов сталей в значительной степени зависят от вида выплавки и параметров термообработки (микроструктуры) стали. Наряду с пределом текучести они могут быть успешно применены для выбора оптимального состояния параметров термообработки штамповых сталей.

## Литература

1. GILLEMOT, L.: Kovácskonferencia. Budapest, 1968.
2. GILLEMOT, L.: Métallurgie et Constr. Méc. 6-7, 333—340, 324 (1959).
3. ARTINGER, I.: Bányászati és Kohászati Lapok. Kohászat 4, 159—163 (1970).
4. ARTINGER, I.: II. Konferenz über Werkzeuge und Werkzeugmaterialien Bd. 1. 227—232. Budapest, 1971.
5. GILLEMOT, L.—SINAY, G.: Acta Techn. Hung. 22, 149 (1958).
6. ARTINGER, I.—CZOBOLY, E.: Gép 12, 464—471 (1970).
7. ARTINGER, I.: VI. Hüttenmännische Materialprüfer Tagung. Vorträge, Bd. II. 280—285. Balatonszéplak, 1971.
8. ARTINGER, I.: Periodica Polytechnica M. 15, 323—329 (1971).
9. WESTERGAARD, H.: Mat. Research and Stand. 3, 196—203 (1962).
10. ИВАНОВА, В. С.: Усталость и хрупкость металлических материалов. 49—72 Москва, 1968.
11. IRWIN, G. R.—SRAWLEY, I. E.: Materialprüfung 1, 1—11 (1962).
12. ИВАНОВА, В. С.—КУДРЯШОВ, В. Г.: Проблемы прочности 3, 17—19 (1970).
13. HEGEDŰS, Z.: II. Konferenz über Werkzeuge und Werkzeugmaterialien, Bd. 2. 381—387. Budapest, 1971.
14. MARKÓ, I.: II. Konferenz über Werkzeuge und Werkzeugmaterialien. Bd. 1. 99—106. Budapest, 1971.

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