

УДК 620.10

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ И ЭКСПЛУАТАЦИОННОМ НАГРУЖЕНИЯХ

© Р. Е. Глинер¹, В. А. Пряничников², Е. Б. Катюхин³*Статья поступила 24 февраля 2015 г.*

Предложена методика количественных оценок сопротивления металлов деформациям при технологическом и эксплуатационном нагружениях, основанная на определении работы деформации при стандартном испытании на растяжение. Данный подход учитывает совокупное влияние на сопротивление деформации прочности и пластичности по новому критерию. Установлена зависимость между этим критерием и стандартным показателем прочности, позволяющая определять приближенные сопротивления деформации, используя известные данные по прочности. Методика апробирована при испытании металлов, обладающих различной прочностью и пластичностью (стали, никелевые сплавы, медь), обеспечиваемых проведением соответствующих термической и пластической обработок. Это позволяет рекомендовать ее для решения задач, связанных с выбором марки и технологических режимов упрочнения и разупрочнения металла.

Ключевые слова: металлы; механические свойства; работа деформации; растяжение; прочность; пластичность.

Прогнозирование сопротивления металлов технологическому и эксплуатационному нагружениям по оценкам прочности и пластичности не учитывает их совокупного влияния. Более результативной представляется оценка по поглощенной при деформации энергии (работе деформации) по аналогии с тем, как такого рода совокупная механическая характеристика используется в оценках сопротивления металла разрушению [1, 2]. При этом работа деформации ($A_{\text{деф}}$) определяется в испытаниях на растяжение по площади, заключенной между первичной диаграммой и осью абсцисс (рис. 1).

Применение современных испытательных машин, оснащенных программным обеспечением для анализа кривых растяжения с определением их характерных точек и аппроксимаций этих кривых позволяет находить $A_{\text{деф}}$ без усложнения испытания и снижения его оперативности.

На стадии сосредоточенного удлинения сопротивление деформации проявляется в объеме, пренебрежимо малым по сравнению с объемом, нагружаемым на стадиях упругого и устойчивого (равномерного) пластического удлинения. С другой стороны, условия технологического и эксплуатационного нагружения металла не предполагают макроскопическую локализацию деформации, приводящую к разрушению. Поэтому в оценках сопротивления деформации при технологическом или эксплуатационном нагружении практический интерес представляет работа деформации,

соответствующая площади, примыкающей к оси ординат, ограниченной пунктирной линией на рис. 1.

Таким образом, при определении сопротивления деформации оценка величины $A_{\text{деф}}$ сводится к вычислению работ упругого ($A_{\text{упр}}$) и пластического равномерного ($A_{\text{равн}}$) удлинений:

$$A_{\text{упр}} = \frac{P_{\text{упр}} \Delta L_{\text{упр}}}{2}, \quad (1)$$

$$A_{\text{равн}} = \int_0^{\Delta L_B} P_{\Delta L} d(\Delta L). \quad (2)$$

(Очевидно, что в процессе растяжения $A_{\text{равн}}$ включает в себя и упругую составляющую удлинения.)

Если отнести сумму ($A_{\text{упр}} + A_{\text{равн}}$) к деформируемому объему испытуемого образца $V_{\text{деф}} = F_0 l_0$ (F_0 и l_0 — площадь и рабочая длина испытуемого образца),

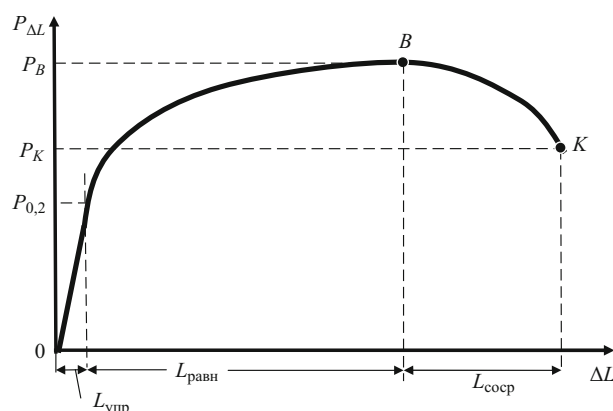


Рис. 1. Первичная диаграмма растяжения (схема)

¹ Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, г. Н. Новгород, Россия; e-mail: gleenl@yandex.ru

² ООО «ВолгоСтальПроект», г. Н. Новгород, Россия.

³ РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия.

то получим удельную работу $a_{\text{деф}}$ — характеристику, пригодную для ранжирования металлов по работе (энергии), затрачиваемой на их упругую и равномерную пластическую деформацию (аналогично ранжированию металла по $\sigma_{0,2}$ и σ_b).

Отношение удельной работы к относительному логарифмическому (истинному) равномерному удлинению в данном растяжении ($\epsilon_{\text{равн}}$), принимаемому за 100 %, позволит получить дополнительную характеристику деформируемости — относительную удельную работу, вызывающую истинное удлинение на один процент:

$$a_{\epsilon} = \frac{a_{\text{деф}}}{\epsilon_{\text{равн}}} \cdot 100. \quad (3)$$

При этом истинное удлинение принято выражать в долях единицы. Но для удобства использования a_{ϵ} значение $\epsilon_{\text{равн}}$ в формуле (3) целесообразно выразить в процентах, как и относительные условные удлинения δ (принимая $\epsilon_{\text{равн}} = 100 \%$).

Заметим также, что удлинение, выявляемое в испытании одноосным растяжением, совпадает с более общим показателем деформированного состояния — интенсивностью деформации. Этот показатель отличается характерное качество [3, с. 33]: независимо от способа деформирования, интенсивность деформации имеет одно и то же значение, если на нее затрачивается одинаковая механическая работа.

Таким образом, использование в формуле (3) истинного удлинения фактически означает нормирование удельной работы по интенсивности деформации, что позволяет применять показатель a_{ϵ} , определяемый испытанием на растяжение, для оценки сопротивления металла деформации при любых способах технологического и эксплуатационного деформирования.

Показатель a_{ϵ} не исключает, а дополняет оценку деформируемости по $a_{\text{деф}}$. Эти параметры отражают разные стороны процесса деформации при нагружении: $a_{\text{деф}}$ — предельное для данного металла необратимое формоизменение при нагружении, когда отсутствует локализация деформации; a_{ϵ} — податливость [3, с. 54] металла как способность к необратимому формоизменению при постепенно возрастающем нагружении. Увеличение $a_{\text{деф}}$ означает повышение как технологичности, так и работоспособности металла, уменьшение a_{ϵ} — улучшение обрабатываемости металла при технологическом нагружении и чаще всего снижение его эксплуатационных качеств.

Цель данной работы — сравнительная оценка численных значений показателей $a_{\text{деф}}$ и a_{ϵ} , характеризующих металл различного назначения, обладающий различной прочностью и пластичностью.

Исследование проводили с использованием стандартных испытаний на растяжение образцов, изготовленных из сталей, никелевых сплавов, а также меди, применяемых для изготовления деталей различного конструкционного назначения. Структура образцов соответствовала состоянию металла в производственных партиях готовых изделий или партиях, предназна-

Таблица 1. Характеристики цилиндрических образцов («продольных»)

Марка металла	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	$\delta_{\text{кон}}$, %	Примечание
10	228	317	43	Металл, подвергаемый технологическому деформированию
ХН58МБЮ-ИД	422	880	53	
30ХГСА	447	736	14	
02Н18К9М5Т-ИД	898	1131	10,7	
М2	49	213	65	Металл в готовых изделиях, прошедших определенную термическую обработку
08Х18Н9	225	568	59	
03Х21Н32МЗБ	231	556	61	
10Х18Н9	238	613	64	
22К	337	531	28	
20	277	454	33	
ХН58МБЮ-ИД	640	1106	31	
20Х13	678	835	15	
15Х1М1ФЛ	495	659	20	
38ХНЗМФА	849	989	14	
38ХНЗМФА	882	987	16	Без отпуска
12Х18Н9Т	958	1077	16	
38ХНЗМФА	1387	1476	8	
02Н18К9М5Т-ИД	1662	1950	11	
30ХГСА после закалки с охлаждением в масло	1240	1925	7,1	
(в деталях, подвергаемых термическому улучшению)	1397	1831	8,6	
	1359	1577	7,8	
	895	987	14,2	
				Отпуск 200 °С
				Отпуск 400 °С
				Отпуск 600 °С

ченных для технологического холодного деформирования.

В табл. 1 и 2 приведены характеристики испытываемых образцов.

Растяжение выполняли на универсальных испытательных машинах, оборудованных индуктивным тензодатчиком для непрерывного измерения удлинений, с записью кривых растяжения. Полученные кривые подвергали компьютерной обработке с аппроксимацией графиков в виде многочленов:

$$P_i = k_0 + k_1 \Delta L_i + k_2 \Delta L_i^2 + k_3 \Delta L_i^3 + k_4 \Delta L_i^4. \quad (4)$$

Выбранная аппроксимация, максимально упрощая интегрирование (2), позволяет наиболее точно отразить детали всех участков диаграммы, а следовательно, оптимально точно определить $A_{равн}$, а также P_v и ΔL_v .

Полученный многочлен использовали как подынтегральную функцию при вычислении интеграла (2) в интервале пластических удлинений от 0 до точно установленного значения ΔL_v .

В качестве примера на рис. 2 приведены результаты аппроксимаций диаграммы растяжения стали 08X18H9. Данные компьютерной обработки испытаний всех образцов представлены в табл. 3.

Они иллюстрируют общепринятое [4] представление о работе деформации как комплексной характеристике, определяемой совокупностью более простых механических свойств — прочностных и пластических. При этом конкретным значениям $a_{деф}$ будут соответствовать определенные сочетания предельных напряжений и удлинений в областях упругой и равномерной пластической деформации. Характерно, что в этих сочетаниях проявляется большее влияние предельных удлинений. В то же время на формирование величины a_e больше влияет прочность. Отсутствие корреляции между $a_{деф}$ и a_e подтверждает разноплановое отражение ими процесса деформации.

Рассматривая анализируемые данные как статистическую совокупность металлов с широким диапазоном прочности и пластичности, можно заметить,

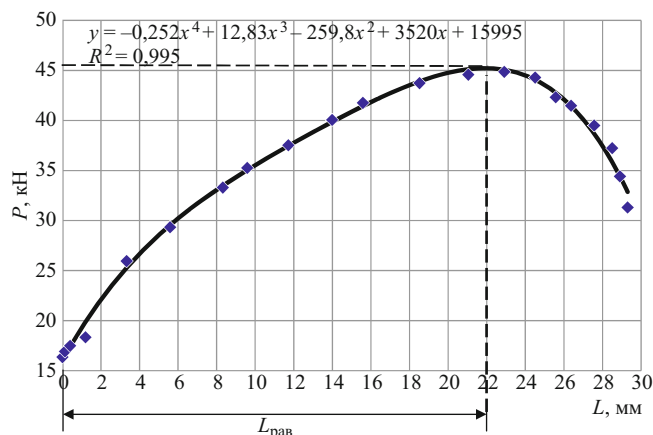


Рис. 2. Результаты компьютерного анализа диаграммы растяжения (сталь 08X18H9)

что диапазон изменения $a_{деф}$ в несколько раз выше диапазона изменения других показателей (рис. 3).

Это определяет роль $a_{деф}$ и a_e как оценочных показателей механических свойств металлов, характеризующих происходящие в них изменения в процессе технологического или эксплуатационного нагружения (наряду с общепринятыми показателями прочности и пластичности).

Как отмечалось ранее, уменьшение a_e означает снижение сопротивления служебному нагружению. При этом можно представить случаи, когда уменьшение a_e оказывается полезным с точки зрения функционального назначения изготавливаемых из металла изделий. Например, это характерно для облицовок кумулятивных зарядов, изготавливаемых из медной ленты М06. В процессе срабатывания заряда под действием энергии ударной волны и продуктов детонации происходит пластическое течение металла облицовки с последующим формированием «кумулятивной струи». Как установлено, увеличение пластичности (т.е. уменьшение a_e) металла готовых облицовок способствует повышению пробивной способности заряда, т.е. является показателем увеличения служебных качеств металла.

Таблица 2. Характеристики плоских образцов

Марка металла (состояние)	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_v , МПа	$\delta_{кон}$, %	Структурное состояние металла
08Ю*	186	287	41	Перед технологическим деформированием
08ГСЮТ*	277	454	30	
М06 **	320	339	9,8	
08Ю (после лабораторной прокатки до 0,8 мм и нагрева на 180 °С)	275	326	21	В деталях, получаемых листовой штамповкой, с нанесенным лакокрасочным покрытием, подвергнутом горячей сушке
08ГСЮТ (после лабораторной прокатки до 0,8 мм и нагрева на 180 °С)	305	423	14	
М06 (после лабораторной прокатки до 0,5 мм)	373	407	2,3	В деталях, получаемых ротационной вытяжкой
М06 (после лабораторной прокатки и отжига для снятия наклепа)	42	218	32,4	В деталях, полученных ротационной вытяжкой и прошедших отжиг

* Лист холоднокатаный толщиной 0,9 мм, проходящий рекристаллизационный отжиг.

** Лента холоднокатаная толщиной 2,0 мм, не проходящая отжиг для снятия прокатного наклепа.

Таблица 3. Основные результаты испытаний (с сортировкой по возрастанию $a_{\text{деф}}$)

Марка металла (состояние)	$a_{\text{деф}}$, МДж/мм ³	$a_{\text{г}}^*$, МДж/мм ³	$\epsilon_{\text{упр}}$	$\epsilon_{\text{равн}}$	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{\text{в}}^{**}$, МПа
08ГСЮТ (после штамповки и покрытия)	6,1	2,2	0,01	0,03	431	500
08Ю (после штамповки и покрытия)	10,1	1,7	0,01	0,06	275	326
Медь М06 (после лабораторной прокатки)	10,7	2,4	0,03	0,01	320	339
М06 (в прокате)	40,4	1,9	0,19	0,02	380	407
08Ю (в прокате)	40,5	1,5	0,01	0,27	177	283
08ГСЮТ (в прокате)	47,4	2,3	0,01	0,20	346	423
20	54,3	3,9	0,02	0,11	299	472
02Н18К9М5Т-ИД (после закалки)	55,8	6,9	0,05	0,03	898	1131
38ХНЗМФА	57,9	7,5	0,03	0,06	830	1047
М06 (после лабораторной прокатки и отжига)	59,1	2,0	0,002	0,30	52	215
38ХНЗМФА	62,3	9,0	0,05	0,02	1309	1464
15Х1М1ФЛ	65,2	5,6	0,03	0,09	497	749
20Х13	65,3	6,7	0,03	0,06	660	870
М2	65,5	1,9	0,01	0,29	40	224
22К	69,2	4,5	0,02	0,12	371	615
38ХНЗМФА	78,1	7,8	0,04	0,06	899	1065
30ХГСА (прокат)	81,8	6,0	0,02	0,10	447	736
12Х18Н9Т	84,0	7,9	0,05	0,06	945	1149
30ХГСА (отпуск 400 °С)	88,0	10,7	0,05	0,04	1359	1577
30ХГСА (отпуск 600 °С)	93,0	8,1	0,04	0,06	895	987
10 (прокат)	96,4	2,8	0,02	0,31	230	431
30ХГСА (без отпуска)	112,7	12,8	0,04	0,05	1240	1925
30ХГСА (отпуск 200 °С)	115,1	12,1	0,05	0,05	1397	1831
02Н18К9М5Т-ИД (после закалки и старения)	163,5	12,5	0,08	0,05	1662	1950
08Х18Н9	173,6	5,2	0,02	0,32	210	838
03Х21Н32	205,0	5,4	0,02	0,36	233	841
10Х18Н9	205,9	5,7	0,02	0,34	282	928
ХН58МБЮ-ИД	289,5	10,5	0,03	0,25	640	1106
ХН58МБЮ-ИД (в прокате)	363,6	8,9	0,02	0,39	422	880

* Количество МДж/мм³, требуемое для увеличения интенсивности деформации ϵ на один процент.

** Истинная прочность.

Путем анализа установлена достаточно тесная корреляционная связь между $a_{\text{г}}$ и временным сопротивлением $\sigma_{\text{в}}$, что позволяет оценивать показатель $a_{\text{г}}$, используя известные данные по $\sigma_{\text{в}}$ (рис. 4).

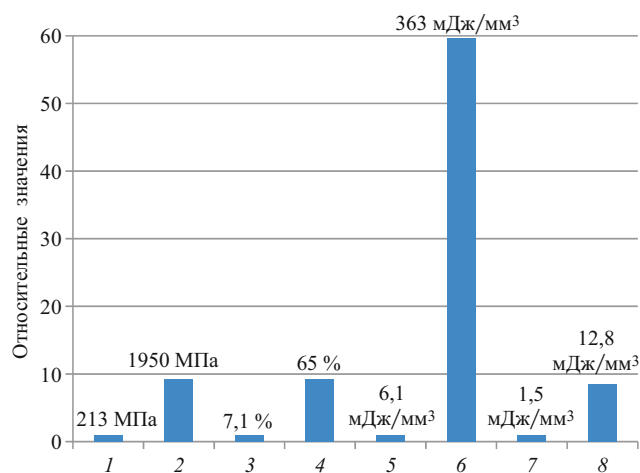


Рис. 3. Гистограмма, характеризующая колебания механических показателей в анализируемой статистической совокупности: 1 и 2 — $\sigma_{\text{в}}^{\text{мин}}$ и $\sigma_{\text{в}}^{\text{макс}}$; 3 и 4 — $\delta_{\text{кон}}^{\text{мин}}$ и $\delta_{\text{кон}}^{\text{макс}}$; 5 и 6 — $a_{\text{деф}}^{\text{мин}}$ и $a_{\text{деф}}^{\text{макс}}$; 7 и 8 — $a_{\text{г}}^{\text{мин}}$ и $a_{\text{г}}^{\text{макс}}$

В табл. 4 показано влияние нагрева на сопротивление технологическому нагружению стали различной прочности. Видно, что если при температуре 600 °С («полугорячая» штамповка) сохраняется разница в сопротивлении деформированию металла, характерная для комнатной температуры, то при 1200 °С сопротивление всех рассматриваемых сталей оказывается одинаковым.

Основным требованием к ненауглероженной сердцеvine образца цементируемой стали является обес-

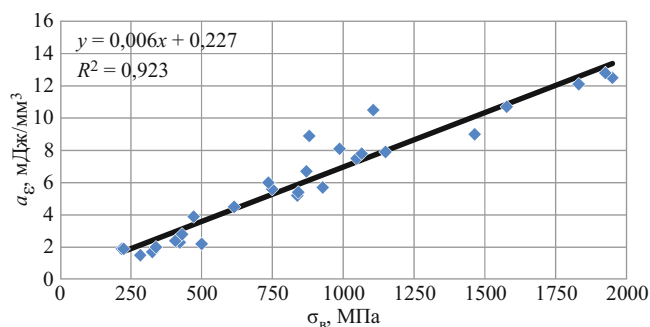


Рис. 4. Функциональная связь сопротивления деформации с прочностью

Таблица 4. Значения a_ϵ стали, деформированной при нагреве*

Марка стали	Микроструктура при 20 °С	Температура нагрева, °С	σ_B , МПа	a_ϵ	
				мДж/мм ^{3**}	Относительное значение
18Х2Н4В	Мартенсит	20	1220	7,5	1,00
		600	644	4,1	0,54
		1200	19	0,3	0,05
60С2	Троостит	20	1021	6,4	0,84
		600	275	1,9	0,25
		1200	14	0,3	0,04
Х12М	Сорбит, цементит	20	737	4,6	0,62
		600	276	1,9	0,25
		1200	8	0,3	0,04
30ХГС	Перлит, феррит	20	711	4,5	0,60
		600	186	1,3	0,18
		1200	18	0,3	0,04
12ХН3	Феррит, перлит	20	640	4,1	0,54
		600	228	1,6	0,21
		1200	16	0,3	0,04
1Х13	Феррит, мартенсит	20	538	3,5	0,46
		600	165	1,2	0,16
		1200	12	0,3	0,04
15	Феррит, перлит	20	439	2,9	0,38
		600	126	1,0	0,13
		1200	14	0,3	0,04

* Значения σ_B взяты из работы [5].** Количество мДж/мм³, требуемое для увеличения интенсивности деформации ϵ на один процент.

печение высокого сопротивления деформации при эксплуатационном нагружении. Это необходимо для минимизации эксплуатационных деформаций высокоуглеродистого поверхностного слоя, обладающего низкой предельной пластичностью. С учетом этого стандарт (ГОСТ 4543) регламентирует минимальные значения σ_B для цементируемых сталей.

В табл. 5 приведены результаты определения величины a_ϵ с использованием стандартных значений σ_B для цементируемой стали различных марок, иллюстрирующие влияние прочности стали на сопротивление эксплуатационному деформированию. Величина a_ϵ может использоваться в инженерных расчетах, в частности, при выборе оборудования для обработки давлением, когда востребована информация об энергетических показателях, характеризующих сопротивление технологическому деформированию. Для этого достаточно иметь сведения об интенсивности технологической деформации $\epsilon_{\text{техн}}$ и объеме деформирования в данной технологии $V_{\text{техн}}$. Энергия, необходимая для выполнения данного технологического деформирования на выбранном оборудовании, составит

$$W_{\text{деф}} = \epsilon_{\text{техн}} a_\epsilon V_{\text{техн}}.$$

Так, величину a_ϵ можно рассматривать в качестве механической характеристики, пригодной для инженерных расчетов.

Таким образом, предложена методика количественной оценки сопротивления деформации метал-

Таблица 5. Значения a_ϵ при деформировании цементированной стали

Марка	σ_B , МПа	a_ϵ	
		мДж/мм ^{3*}	Относительное значение
20Х	600	3,8	1,0
20ХН	780	4,9	1,3
18ХГ	880	5,5	1,4
18ХГТ	980	6,1	1,6
20ХГНР	1180	7,3	1,9
25ХГТ	1270	7,8	2,1
27ХГР	1370	8,4	2,2

* Количество мДж/мм³, требуемое для увеличения интенсивности деформации ϵ на один процент.

ла при технологическом и эксплуатационном нагружении.

Методика апробирована на металле различной прочности и пластичности, полученными в результате проведения соответствующей термической и пластической обработки. Это позволяет рекомендовать ее для решения задач, связанных с выбором марки и технологических режимов упрочнения и разупрочнения металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жильмо Л. Характеристика свойств конструкционных сталей работой предельных деформаций. — В сб. «Современные проблемы металлургии». — М.: ИМЕТ, 1957. С. 572 – 582.

2. **Иванова В. С.** Синергетика: Прочность и разрушение металлических материалов. — М.: Наука, 1992. — 155 с.
3. **Смирнов-Аляев Г. А.** Сопротивление материалов пластическому деформированию. — Л.: Машиностроение, 1978. — 368 с.
4. **Новиков И. И., Золоторевский В. С., Портной В. К. и др.** Металловедение. Учебник. В 2-х томах. Т. 1 / Под ред. В. С. Золоторевского — М.: Издательский дом МИСиС, 2009. — 496 с.
5. **Зуев М. И. и др.** Пластичность стали при высоких температурах. — М.: Metallurgizdat, 1954. — 70 с.

REFERENCES

1. **Zhil'mo L.** Kharakteristika svoistv konstruktsionnykh stalei rabotoi pre-del'nykh deformatsii [Characteristic properties of structural steel work

pre-individual strains] / Coll. "Sovremennyye problemy metallurgii." — Moscow: IMET, 1957. P. 572 – 582 [in Russian].

2. **Ivanova V. S.** Sinergetika: Prochnost' i razrushenie metallicheskih materialov [Synergetics: strength and fracture of metallic materials]. — Moscow: Nauka, 1992. — 155 p. [in Russian].
3. **Smirnov-Alyayev G. A.** Soprotivlenie materialov plasticheskomu deformirovaniyu [Strength of materials to plastic deformation]. — Leningrad: Mashinostroenie, 1978. — 368 p. [in Russian].
4. **Novikov I. I., Zolotarevskii V. S., Portnoi V. K., et al.** Metallovedenie. Uchebnik [Metal science. Textbook]. In 2 volumes. Vol. 1. — Moscow: Izdatel'skii dom MISiS, 2009. — 496 p. [in Russian]
5. **Zuev M. I. i dr.** Plastichnost' stali pri vysokikh temperaturakh [Ductility at high temperatures]. — Moscow: Metallurgizdat, 1954. — 70 p. [in Russian].