ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

В.В. Уваров, В.С. Уварова, Е.А. Носова

ТЕРМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ КОВКИ, ШТАМПОВКИ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Издание второе, переработанное и дополненное

Утверждено Редакционно-издательским советом университета в качестве учебного пособия

САМАРА 2006

УДК 621.73 (075)

Рецензенты: проф. И. П. П о п о в
И. В. О с и н о в с к а я

Уваров, В.В.
Термические режимы ковки, штамповки и предварительной термообработки заготовок: учеб. пособие / В.В. Уваров, В.С. Уварова, Е.А. Носова, 2-е изд., перераб. и доп.; Самар. гос. аэрокосм. ун-т. – Самара, 2006. 87 с.

ISBN 5-7883-0403-2

Рассматриваются вопросы нагрева и охлаждения металла при ковке и штамповке, а также процессы предварительной термообработки поковок. Описываются основные явления, характерные для всего термического цикла ковки и штамповки. Приводятся конкретные данные для назначения рациональных термических режимов ковки, штамповки и последующей термообработки заготовок.

Пособие предназначено для студентов металлургической специальности при курсовом и дипломном проектировании. Оно может быть использовано также в области технологической подготовки студентов по авиационным специальностям. Выполнено на кафедре «Технология металлов и авиаматериаловедение».

ISBN 5-7883-0403-2

© Уваров В.В., Уварова В.С.,
Носова Е.А., 2006
© Самарский государственный
аэрокосмический университет,
2006

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение..... 4
1 ТЕРМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ КОВКИ И ШТАМПОВКИ..... 6
1.1 Изменение свойств металлических материалов при нагреве..... 6
1.2 Возврат и рекристаллизация при нагреве..... 7
1.3 Угар и обезуглероживание стали при нагреве..... 18
1.4 Перегрев и пережог металла..... 23
2 ВЫБОР ТЕМПЕРАТУРНОГО ИНТЕРВАЛА КОВКИ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ..... 25
2.1 Режимы нагрева заготовок..... 30
2.2 Режимы охлаждения заготовок..... 40
3 ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛЬНЫХ ПОКОВОК И ШТАМПОВОК..... 43
3.1 Назначение, основные виды и структура, получаемая в процессе проведения предварительной термической обработки..... 43
3.2 Типовые схемы предварительной термообработки сталей..... 53
3.3 Типовые режимы предварительной термической обработки наиболее употребляемых марок сталей..... 56
3.4 Уровень механических свойств после различных видов предварительной термической обработки..... 63
3.5 Предварительная термическая обработка поковок из цветных сплавов..... 66
ПРИЛОЖЕНИЯ..... 80
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 86

ВВЕДЕНИЕ

В машиностроении весьма существенную роль играет заготовительное производство, поскольку оно является важнейшей составной частью всего технологического комплекса процесса изготовления деталей и узлов. В современном производстве при правильной разработке технологического процесса обработки давлением и обеспечении необходимого термомеханического режима в сочетании с оптимальной термической обработкой можно создать в обрабатываемом металле такую структуру и свойства, которые в наибольшей мере удовлетворяли бы требованиям, предъявляемым к изготавливаемой из него детали.

Как способ предания металлу требуемой формы обработка металлов давлением успешно соперничает с другими видами заготовительных производств, превосходя их по качеству металла и надежности в эксплуатации. Так, механические свойства (ударная вязкость, пластичность, усталостная прочность и др.) металла кованых и штампованных деталей после соответствующей термической обработки выше, чем у металла литых деталей. Под предварительной термической обработкой (ПТО) понимают обработку, которая предназначена для решения задачи улучшения технологических свойств металла или технологичности, что важно для изготовления деталей или улучшения механических свойств готовых изделий, которые не могут быть достигнуты только в результате одной окончательной термической или химико-термической обработки.

Технологические задачи, решаемые методами ПТО, – это подготовка или получение такой структуры, которая обеспечивает лучшую обрабатываемость резанием или пластическим деформированием, уменьшает уровень остаточных напряжений и коробление, а также ускоряет процессы диффузии при окончательной термообработке.

Для реализации задачи улучшения свойств после окончательной обработки можно использовать методы ПТО в трех основных направлениях. Во-первых, обработка, связанная с воздействием на

структуру матрицы; во-вторых, с созданием определенной субструктуры с тем, чтобы её элементы сохранились и при последующей фазовой перекристаллизации; в-третьих, с воздействием на избыточные фазы (главным образом труднорастворимые частицы), не претерпевающие существенных изменений при повторных более низкотемпературных нагревах. Таким образом, создание оптимальных технологических процессов предварительной термообработки, одновременно улучшающих свойства готовых изделий и обеспечивающих условия их изготовления в производстве, является важной инженерной задачей в машиностроении.

1 ТЕРМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ КОВКИ И ШТАМПОВКИ

1.1 Изменение свойств металлических материалов при нагреве

Термический цикл ковки или штамповки состоит из трех этапов:

– нагрев металла перед ковкой или штамповкой;

– остывание металла в течение выполнения операции ковки или штамповки в кузнечных агрегатах;

– охлаждение металла по окончании процесса ковки или штамповки.

Все эти этапы связаны с изменением температуры деформируемого металла. Поэтому для правильного построения технологического процесса ковки или штамповки в первую очередь необходимо знать: как меняются свойства металла при нагреве; какие явления происходят в металле при его нагреве и охлаждении?

Тепло, поглощаемое металлом при нагреве, расходуется на увеличение энергии тепловых колебаний атомов и, следовательно, их подвижности в кристаллической решетке. Поэтому при нагреве практически все металлы и сплавы имеют тенденцию к увеличению пластических свойств (например, δ и ψ) и уменьшению показателей прочности (например, $\sigma_{0,2}$ и $\sigma_в$). Эта закономерность проявляется до температур нагрева, не превышающих начала образования в металле жидкой фазы.

Характер изменения механических свойств в зависимости от температуры определяется, в основном, двумя факторами:

– физико-химическими процессами, происходящими в металле при нагреве;

– химическим составом сплава.

За счет этих факторов нарушается монотонный характер уменьшения прочностных показателей и повышения показателей пластичности. Так, при нагреве углеродистых сталей (% С до 0,45) в области температур фазовых превращений сопротивление деформации несколько увеличивается. Это связано с тем, что фазовые превращения и вызванные ими изменения объема происходят неравномерно во всех зернах, что приводит к появлению дополнительных напряжений и повышению прочностных характеристик. В интервалах температур старения прочность также повышается из-за блокирования систем скольжения выпавшими из раствора дисперсионными частицами второй фазы.

Аналогично в определенных температурных интервалах в связи с фазовыми превращениями и появлением неоднородных структур, выпадением дисперсных частиц из твердого раствора могут наблюдаться провалы пластичности.

Влияние химического состава проявляется и в том, что, как правило, легирующие элементы и примеси повышают прочностные показатели. Так, в высоколегированных сплавах примеси повышают прочностные характеристики при высоких температурах в несколько раз. В отношении пластичности примеси и легирующие добавки могут вызвать как провалы, так и повышение пластичности сплава, подавляя вредное влияние других компонентов и примесей [1].

Для практической оценки влияния температуры на свойства при расчетах силовых параметров и предельного формоизменения в процессах ковки и штамповки используют экспериментальные данные лабораторных исследований. Эти данные для большинства металлов и сплавов можно в настоящее время взять из справочной и технической литературы [2-7]. В табл. 1.1-1.8 приведены механические свойства сталей, цветных металлов и сплавов при повышенных температурах.

1.2 Возврат и рекристаллизация при нагреве

Под явлениями возврата и рекристаллизации понимаются процессы освобождения деформированного металла от искажений и дефектов его кристаллической структуры, сопровождающиеся снятием внутренних напряжений, образованием новых равноосных зерен взамен деформированных, а также дальнейшим ростом зерна с одновременным снижением показателей сопротивления деформации и увеличением пластичности. Возврат и рекристаллизация наблюдаются в следующих основных случаях:

– при отжиге металла или сплава, упрочненного в процессах холодной деформации;

– в процессах деформации металла при повышенных температурах.

В последнем случае в металле происходят одновременно два противоположных явления – процессы упрочнения и разупрочнения.

Возвратом называют все изменения тонкой структуры и свойств, не затрагивающие микроструктуру деформированного металла, другими словами, размер и форма зерен при возврате не меняются. Возврат, в свою очередь, подразделяют на две стадии – отдых и полигонизацию.

Таблица 1.1

Механические свойства конструкционных, углеродистых качественных и конструкционных легированных сталей при повышенных температурах

Температура, °С	30			45			20Х			40Х			18ХГТ			30ХГСА		
	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ,%
20	530	25	52	–	–	–	–	–	–	–	–	–	520	26	77	1100	14	45
200	–	–	–	690	10	36	–	–	–	880	15	42	460	24	78	–	–	–
300	580	21	51	710	22	44	–	–	–	870	17	58	465	24	68	980	11	50
400	460	23	58	560	21	65	–	–	–	690	18	68	470	29	75	900	16	69
500	350	24	70	370	23	67	–	–	–	490	21	80	410	27	76	690	21	81
600	195	35	83	215	33	90	270	36	85	–	–	–	325	45	86	–	–	–
700	–	–	–	170	43	96	150	48	89	175	33	78	235	46	88	175	59	51
800	98	49	98	110	58	98	93	56	74	98	59	98	135	51	94	85	62	75
900	77	53	100	76	62	100	84	64	88	69	65	100	95	55	96	53	84	90
1000	48	56	100	50	72	100	51	78	97	43	68	100	78	58	100	37	71	90
1100	30	58	100	34	81	100	33	98	100	26	68	100	43	61	100	21	59	90
1200	21	64	100	27	90	100	25	–	–	24	70	100	25	26	100	10	85	90

Таблица 1.2

Механические свойства конструкционных легированных, подшипниковых и рессорно-пружинных сталей при повышенных температурах

Температура, °С	12ХН3А			40ХН2МА			18Х2Н4А			34ХН3М			ШХ15			60С2		
	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %
20	640	22	65	1070	16	58	1240	12	61	960	19	49	–	–	–	1020	17	36
200	560	20	71	–	–	–	1190	12	60	900	16	60	–	–	–	–	–	–
300	610	18	58	990	14	53	1200	14	64	910	17	56	–	–	–	1030	24	63

Окончание табл. 1.2

400	625	19	55	950	17	63	1060	14	69	860	21	70	–	–	–	830	21	69
500	405	26	75	700	18	80	880	14	70	610	18	75	–	–	–	510	35	68
600	230	35	65	–	–	–	–	–	–	480	25	89	–	–	–	275	20	31
700	130	43	67	185	17	32	265	31	69	180	47	96	–	–	–	165	28	51
800	81	27	28	89	66	90	130	35	34	145	62	98	130	35	43	81	102	94
900	52	19	22	50	69	90	79	22	23	91	67	98	88	43	50	57	101	97
1000	40	47	56	35	75	90	55	31	36	66	72	100	59	42	50	34	86	71
1100	28	72	98	24	72	0	36	53	100	–	–	–	39	40	50	26	83	100
1200	16	56	99	14	62	90	25	46	100	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Таблица 1.3

Механические свойства ряда инструментальных сталей при повышенных температурах

Температура, °С	У7А			У12А			9ХС			Х12МФ			Р6М5К			Р18		
	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	ψ, %	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	ψ, %	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	ψ, %	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	ψ, %	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	ψ, %	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	ψ, %
20	670	16	30	690	28	45	790	26	54	–	–	–	–	–	–	840	8	10
200	660	13	22	570	23	47	710	22	48	–	–	–	870	10	11	830	13	22
300	–	18	20	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
400	620	22	26	450	41	60	620	32	63	–	–	–	770	12	11	700	15	22
500	460	27	34	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
600	330	33	45	–	–	–	200	52	77	–	–	–	620	28	48	480	31	55
700	105	64	90	76	56	82	98	58	77	140	44	68	–	–	–	–	–	–
800	94	65	00	72	59	85	–	–	–	125	45	58	270	55	60	200	60	70
900	63	60	100	40	52	91	74	41	95	81	46	54	–	–	–	–	–	–
1000	36	62	100	38	55	98	46	52	–	46	47	49	130	57	0	100	42	55
1100	22	65	100	18	74	100	31	54	–	25	48	48	–	–	–	–	–	–
1200	17	12	100	15	92	100	20	83	100	8	3	14	40	8	15	30	12	25

Таблица 1.4

Механические свойства некоторых коррозионно-стойких, жаропрочных, жаростойких сталей и сплавов при повышенных температурах

Температура, °С	12Х13			20Х23Н18			ХН70ВМЮТ			08Х17Т		08Х19Н10		
	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	ψ, %	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	ψ, %	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	ψ, %	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	ψ, %
20	700-730	19-22	66-68	600-660	29-35	47-54	1010-1030	28-32	30-34	460	30	570	60	70
200	650-660	17	67	–	–	–	–	–	–	390	31	–	–	–
300	600-650	14-16	66-69	520-540	25-28	45-49	–	–	–	330	32	–	–	–
400	570	13-15	64-67	540	24-32	39-45	–	–	–	280	33	410	46	69
500	520-540	15-18	70	520-540	25-31	41-45	1000	27	23-34	245	35	370	45	70
600	330-450	20-27	79-85	440	24	46	980	25	18-23	195	36	230	39	58
700	–	–	–	315-330	19-24	35	870-920	22	27-36	155	37	235	35	36
800	82	48	95	255	24	67	710	25	60	78	54	150	30	18
900	78	60	81	135	37	77	280	55	85	59	90	110	23	–
1000	53	68	90	71	49	77	170	60	90	–	–	–	–	–
1100	33	72	96	44	51	70	67	68	93	59	110	–	–	–
1200	20	62	95	27	27	31	55	44	67	59	111	–	–	–

Таблица 1.5

Механические свойства алюминиевых сплавов при повышенных температурах

Состояние сплава	Температура, °С	АМц			АМг3			АВ			Д1			АК6			В95		
		$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %
Литой	50	155	13,5	49,9	250	7,6	31,5	161	12,8	32,3	244	10,9	19,5	248	8,9	1	228	7	32,8
	100	152	14,7	54,9	232	5,1	38,4	159	13,1	37,6	224	15,6	32,9	209	12,9	6,3	200	10,7	51
	200	138	23,1	62,1	183	13,4	51,3	149	13,4	54,3	154	26,6	57,9	143	26,8	41,5	146	26,6	74,4
	300	107	32	61,8	122	35,8	62,4	126	16,1	64,1	75	38,3	77,3	91	41,5	85,1	95	52,5	85,2
	400	67	32,2	56	63	68	71,4	85	18,3	70,3	22	48,8	87,5	61	48,5	97,9	51	87,3	89,4
	450	45	26,2	51,7	40	86,4	75,1	57	19,4	71,2	15	53,1	88,1	35	46,4	92,5	32	107	92,9
	500	24	14,6	46,7	22	105	78	23	21	–	28	56,6	85,2	20	39,2	81	15	129	93,9
Деформированный	50	140	32,8	86,4	250	19,2	56,9	193	23,6	61,8	341	16,1	33,4	310	15,8	27,7	337	8,7	22,4
	100	124	30,4	86,7	220	22,3	62,7	178	25,5	67,4	287	18,4	43,9	262	18,3	39,5	294	8,7	35,4
	200	93	23,9	86,2	172	31,6	74,5	132	26,1	77,8	183	25	72,9	156	26,2	71,6	182	15,4	68,7
	300	62	18,8	86,4	124	46	85,3	79	24,4	85,3	96	33,5	99,8	90	39,2	99,8	71	27,7	99,7
	400	33	19,5	89,7	75	66,9	94	35	21,9	87,7	39	43,6	99,8	57	59	99,8	–	41,6	99,8
	450	21	23,4	93,4	50	80,1	97,2	22	21,3	86,4	25	49,2	99,8	39	71,9	99,8	–	47,9	99,8
	500	11	30,5	98,8	23	95,5	99,3	16	21,5	83,1	25	54,9	94,7	23	87,2	99,8	18	53	98,1

Таблица 1.6

Механические свойства некоторых титановых сплавов при повышенных температурах

Температура, °С	ВТ1		ВТ3-1		ВТ3		ВТ5		ОТ4		ВТ8	
	$\sigma_в$, МПа	δ, %	$\sigma_в$, МПа	δ, %	$\sigma_в$, МПа	δ, %	$\sigma_в$, МПа	δ, %	$\sigma_в$, МПа	δ, %	$\sigma_в$, МПа	δ, %
20	610	27	950-1200	10-16	1150	16	840	15	870	17	1100	10
100	500	–	870	14	950	10	840	15	680	15	1050	9
200	360	–	740	14	830	10	680	12	550	–	–	–
300	210	47	650	14	740	11	580	11	470	–	–	–
400	190	41	600	14	710	12	520	9	390	–	700	19
500	–	–	560	15	610	14	480	–	320	21	580	24
600	170	43	500	40	600	20	420	30	240	43	520	30
700	80	110	220	65	270	77	140	72	120	88	190	55
800	40	114	100	106	80	89	110	105	85	85	100	110
900	20	54	70	105	70	110	60	131	25	81	50	190
1000	10	75	40	270	40	100	40	145	–	72	30	220

Таблица 1.7

Механические свойства магниевых сплавов при повышенных температурах

Темпе-ратура, °С	МА1			МА8			МА5			МА2-1			МА14					
	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %
20	150	240	5	150	260	7	220	320	8	150	260	12	260	320	10	250	310	6
100	130	180	15	110	180	26	220	320	20	120	230	20	160	250	22	200	250	16
150	110	140	18	100	140	36	150	280	41	100	200	29	140	210	33	140	190	25

Окончание табл. 1.7

200	80	130	25	70	120	34	100	150	49	75	140	30	100	150	37	90	160	30
250	50	90	60	–	100	32	60	100	83	50	90	32	65	120	68	50	110	45
300	26	50	85	–	84	53	35	65	120	40	70	40	–	–	–	30	60	–
350	15	25	–	–	50	61	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Таблица 1.8

Механические свойства двойных и многокомпонентных латуней, обрабатываемых давлением, при различных температурах

Температура, °С	М4		Л96		Л80		Л68		Л62		ЛН65-5		ЛЖМц59-1-1		ЛС59-1		ЛК80-3	
	$\sigma_в$, МПа	δ, %	$\sigma_в$, МПа	δ, %	$\sigma_в$, МПа	δ, %	$\sigma_в$, МПа	δ, %	$\sigma_в$, МПа	δ, %	$\sigma_в$, МПа	δ, %	$\sigma_в$, МПа	δ, %	$\sigma_в$, МПа	δ, %	$\sigma_в$, МПа	δ, %
20	230	46	480	–	290	52	320	25	360	51	470	–	460	–	380	–	320	–
100	280	48	460	–	490	–	440	22	320	48	410	–	400	–	360	–	510	–
200	220	46	440	–	400	–	410	15	280	42	370	–	350	–	300	–	480	–
300	160	90	410	–	260	–	320	5	220	30	300	–	260	–	200	–	400	–
400	90	–	340	5	120	–	180	10	150	28	220	18	150	39	100	20	270	–
500	60	–	200	20	60	–	100	22	80	25	160	14	60	39	50	24	150	10
600	40	56	120	24	30	20	50	34	40	25	100	16	20	67	20	30	80	28
700	20	55	–	24	20	24	30	32	20	30	50	20	10	94	10	48	10	42
800	10	70	40	20	20	28	20	72	10	50	20	20	–	100	10	40	10	14
900	10	80	–	–	10	34	–	35	–	65	–	–	–	–	–	–	–	10

Отдых – это стадия возврата, при которой уменьшается количество точечных дефектов. Признаком проявления отдыха является уменьшение прочностных показателей на величину до 10 – 15% от начальных значений и соответственное увеличение характеристик пластичности. Отдых при нагреве является обязательным явлением у всех металлов и сплавов.

Полигонизацией называют стадию возврата, при которой в пределах каждого кристалла образуются новые малоугловые границы. В результате кристалл разделяется на субзерна – полигоны, свободные от дефектов. Полигонизация в отличие от отдыха характерна лишь для небольших степеней деформации и не для всех металлов. Ее проявлением, как правило, является уменьшение прочности и твердости металла.

Рекристаллизацией называют зарождение и рост новых зерен с меньшим количеством дефектов строения и имеющих чаще всего равноосную кристаллическую структуру. Различают две стадии рекристаллизации – первичную (рекристаллизацию обработки) и вторичную стадию (собирательной рекристаллизации).

Первичной рекристаллизацией называется процесс, происходящий при нагреве деформированного металла до температур, вызывающих непрерывное зарождение новых кристаллических центров и рост зерен вокруг них за счет деформированных кристаллов. Деформированная структура целиком заменяется новыми зернами. В результате первичной рекристаллизации наблюдается полное освобождение металла от внутренних напряжений и значительное снижение прочностных характеристик при одновременном увеличении пластичности.

При нагреве холоднодеформированные металлы могут быть рекристаллизованы лишь после деформации, величина которой превышает вполне определенное значение, называемое критической деформацией. Если степень деформации меньше критической, то зарождения новых зерен при нагреве не происходит. Величина критической деформации сравнительно невелика (2–8%) и различна для разных металлов.

Важным понятием является температура рекристаллизации (порог рекристаллизации). Под температурой рекристаллизации $T_р$ понимают наименьшую температуру нагрева, которая обеспечивает возможность зарождения новых зерен. Температура рекристаллиза-

ции составляет некоторую долю от температуры плавления металла $T_{пл}$ в градусах Кельвина $T_р = \alpha T_{пл}$.

Значение коэффициента α зависит от природы металла, его чистоты и степени пластической деформации. Для металлов технической чистоты $\alpha = 0,3 – 0,5$ и понижается с уменьшением примесей (табл. 1.9).

Для сплавов на основе твердых растворов $\alpha = 0,5 – 0,6$, а у тугоплавких и многокомпонентных сплавов α может достигать величин 0,7 – 0,8.

Таблица 1.9

Значения коэффициента α для некоторых металлов технической и высокой чистоты [8]

Металл	$T_{пл}$, К	Техническая чистота		Высокая чистота	
		$T_р$ К	α	$T_р$, К	α
Алюминий	933	423-500	0,45-0,50	220-275	0,24-0,29
Медь	1357	475-505	0,35-0,37	235	0,2
Железо	1808	678-725	0,38-0,40	575	0,31
Никель	1729	775-935	0,45-0,54	575	0,3
Хром	2148	1065	0,5	1010	0,46
Машин	924	375	0,4	250	0,27

По завершению первичной рекристаллизации новые зерна термодинамически неустойчивы, так как их суммарная поверхность велика и запас свободной поверхностной энергии больше, чем у крупных зерен в том же объёме. Поэтому при увеличении выдержки или температуры происходит рост образовавшихся зерен. Эта стадия рекристаллизации называется вторичной или собирательной рекристаллизацией. Рост зерен происходит в результате перехода атомов через границу раздела. Одни зерна при этом постепенно уменьшаются в размерах, а затем исчезают, а другие становятся более крупными, поглощая соседние зерна. С повышением температуры рост зерен ускоряется. Чем выше температура нагрева, тем более крупными окажутся рекристаллизованные зерна.

Рекристаллизация играет значительную роль в процессах ковки и штамповки. Это связано с тем, что пластичность и сопротивление деформации металлов зависят от размера зерен. Сплавы одного и того же состава могут иметь существенно различные свойства в зависимости от размеров, формы и однородности зерен. Размер зерен,

образовавшихся в результате рекристаллизации, определяется в основном степенью пластической деформации и температурой рекристаллизации.

Зависимость величины зерен от степени деформации и температуры обычно представляют графически в виде пространственных диаграмм рекристаллизации. Эти диаграммы строят в координатах F или (D) – ε – T, где F – средняя или максимальная площадь зерна или D – его диаметр; ε – фактическая величина пластической деформации; *T* – температура нагрева при отжиге $T_{отж}$, или температура конца горячего деформирования $T_{деф}$.

Существуют диаграммы рекристаллизации различного вида. Диаграммы рекристаллизации I рода строят в координатах F(D) –ε – $T_{отж}$. Они предназначены для изучения процесса рекристаллизации и оценки структуры после отжига наклепанного металла. Для выбора оптимальных режимов горячей обработки (ковки и штамповки) используют диаграммы рекристаллизации II рода, их строят в координатах F(D) – ε – $T_{деф}$.

На рис. 1.1 представлен общий вид диаграммы рекристаллизации II рода, характерной для большинства металлов и сплавов.

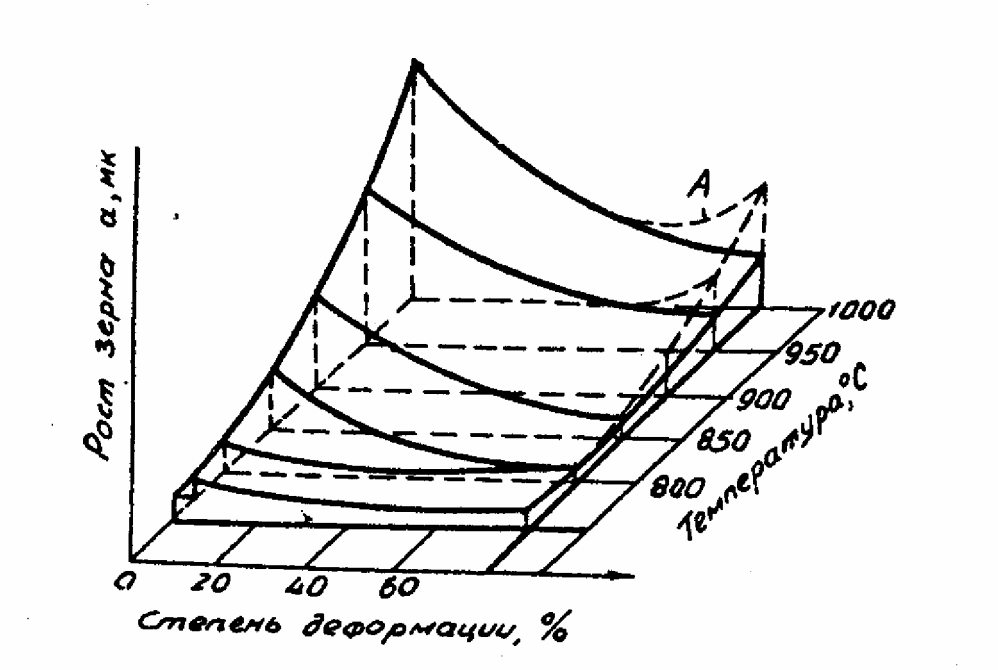


Рис. 1.1. Общий вид диаграммы рекристаллизации II рода

Первый максимум роста зерна происходит при наличии критических степеней деформации. Зона действия критических степеней деформации обычно находится *в* начале процесса формоизменения и

составляет 5–15%. Резкий рост зерен в зоне критических степеней деформации объясняется тем, что при больших деформациях образуется значительное количество равномерно распределенных центров рекристаллизации.

Зерна образуются мелкими и однородными, без контрастов в размерах. Критическая деформация создаст неоднородность распределения центров кристаллизации и условия для интенсивного роста зерна.

Характер диаграммы может несколько измениться при очень высоких степенях деформации (порядка 95% и выше), иначе говоря, здесь появляется второй максимум роста величины зерна, изображенный на рис. 1.1 пунктирными линиями.

Рост зерна при высоких степенях деформации и температурах выше начала рекристаллизации происходит за счет собирательной рекристаллизации.

Количественные выражения по осям координат диаграммы рекристаллизации для конкретных металлов и сплавов определяются экспериментально, и они имеют свои вполне определенные значения и особенности. В качестве примера на рис. 1.2 приведены диаграммы рекристаллизации меди и малоуглеродистой стали.

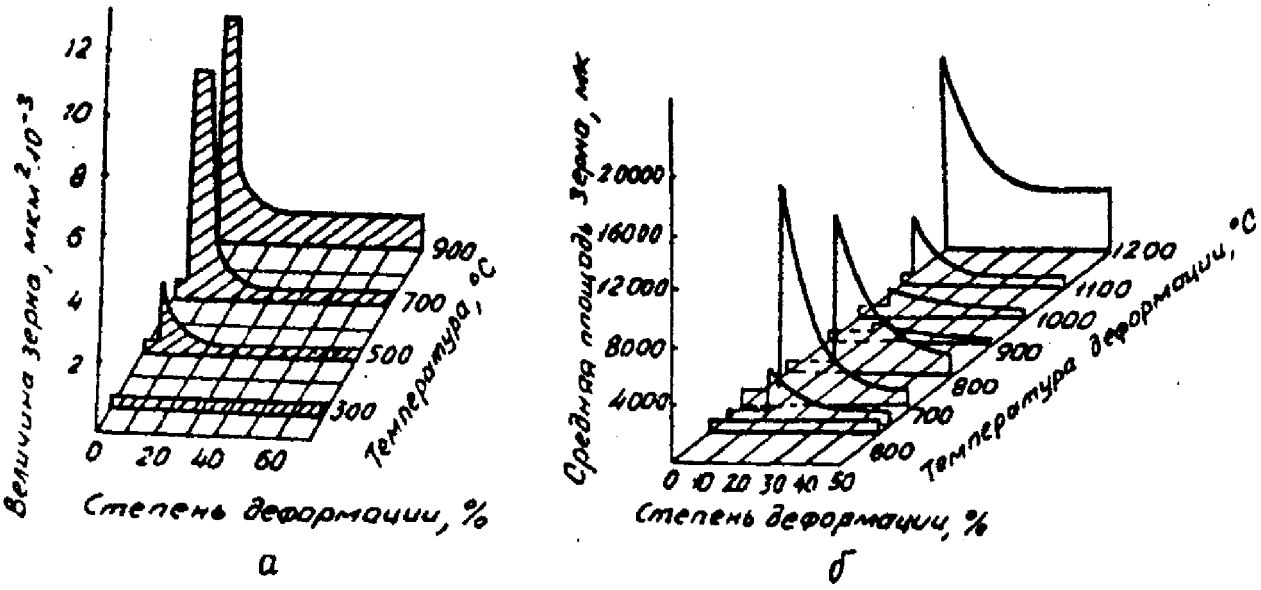


Рис. 1.2. Диаграммы рекристаллизации II рода: *а* – для меди; *б* – для малоуглеродистой стали

Для меди критическая степень деформации составляет 5–10%, причем характер роста зерна и этой зоне однозначно связан с повышением температуры рекристаллизации.

Для малоуглеродистой стали зона критических степеней лежит в пределах 8–15%, а критическая температура – в пределах 750–850°С.

Характерная особенность состоит в том, что при температурах конца горячей обработки выше 900–950°С (выше точки A_{c3}; на диаграмме Fe – C) зерна имеют малые размеры независимо от степени деформации. Объясняется это тем, что закономерности процесса рекристаллизации нарушаются перекристаллизацией, когда величина зерна зависит, в основном, от скорости охлаждения и не чувствительна к степени деформации.

В большинстве случаев желательно получение мелкозернистых поковок, обладающих лучшими механическими свойствами. Поэтому необходимо создавать такие термомеханические условия ковки и штамповки, которые исключают образование крупных зерен, т.е. не допускать критических степеней деформаций и завышенной температуры конца обработки. В ряде случаев при ковке и штамповке трудно избежать зон критической деформации, особенно в последних переходах, где для обеспечения точности назначают малые степени деформации. Избежать роста зерна в этом случае можно, заканчивая обработку при температурах вблизи точки A_{c3}.

В сплавах с фазовыми превращениями, аналогичными превращениям в углеродистых сталях, крупные зерна, полученные в результате ковки или штамповки в области критических деформаций и температур, могут быть измельчены последующей термической обработкой (нормализацией).

В металлах и сплавах без фазовых превращений мелкие зерна после ковки и штамповки могут быть получены только рационально назначенным термомеханическим режимом деформации. Последующей термообработкой нельзя добиться измельчения зерна. В этом случае для измельчения зерна сплавы без фазовых превращений необходимо вновь подвергнуть ковке или штамповке, правильно сочетая температуру и степень деформации.

1.3 Угар и обезуглероживание стали при нагреве

При нагреве стали в обычной окислительной атмосфере возникают процессы окисления и обезуглероживания по поверхности. В табл. 1.10 приведены данные о влиянии основных составляющих печных атмосфер на поверхность нагреваемого металла.

Таблица 1.10

Влияние атмосферы нагревательных устройств на металл

Составляющие печной атмосферы	Составляющие металла		
	карбиды железа	чистое железо	окись железа
O_2	Окисляет и обезуглероживает	Окисляет	Не взаимодействует
CO_2, SO_2, H_2O, H_2S	То же	»	»
CO	Не взаимодействует	Науглероживает	Восстанавливает
CH_4	Не взаимодействует	Науглероживает	Не взаимодействует
H_2	Обезуглероживает	Не взаимодействует	Восстанавливает
N_2	Нейтрален	Нейтрален	Нейтрален

Окисление – процесс химического взаимодействия кислорода и кислородосодержащих газов с железом и легирующими элементами стали. Окисление стали состоит из двух процессов: диффузии кислорода через слой окалины к металлу и встречной диффузии атомов металла через слой окалины на её наружную поверхность. Наиболее близкий к железу слой содержит низкую степень окисления (FeO), наиболее удаленный – высшую (Fe_3O_4).

В результате окисления происходит образование окалины (угар металла). Количественными показателями потерь стали от окисления являются:

U_m – угар по массе, %; количество окисленного при нагреве металла от первоначальной массы;

$\alpha_п$ – поверхностный угар, г/см^2; количество окисленного металла на единицу поверхности заготовки или слитка;

V_0 – скорость окисления; отношение поверхностного угара ко времени нагрева, г/см^2*/ч;*

S – толщина слоя окалины, см; связана с поверхностным угаром соотношением $S=\alpha_п/\rho\varphi_{Fe}$, где ρ – плотность окалины (ρ=3,9–4,0 г/ см^3); (φ_{Fe} – среднее содержание железа в окалине (φ_{Fe} = 0,715–0,765). Скорость окисления (образования окалины) зависит от следующих основных факторов; состава печной атмосферы, температуры и продолжительности нагрева, а также химического состава нагреваемого металла.

В табл. 1.11 показано влияние газовой среды на процесс окисления низкоуглеродистых сталей.

Присутствие паров воды и соединений серы резко увеличивает скорость окисления, а следовательно, и угар металла. Повышение содержания окиси углерода CO в печной атмосфере снижает скорость окисления.

Таблица 1.11

Влияние газовой среды на интенсивность окисления

Газовая среда	Относительное окисление, %
Чистый воздух	100
Чистый воздух +2% SO_2	118
Чистый воздух + 5% H_20	135
Атмосферный воздух + 2% SO_2 + 5%H_2O	276

С повышением температуры увеличивается скорость диффузионных процессов окисления, и угар возрастает. Кроме того, с увеличением времени нагрева возрастает и глубина окисленного слоя. При температурах ниже 600–650°С окисление сталей относительно невелико и практического значения не имеет. При температурах нагрева стали в интервале 900–1300°С интенсивность образования окалины имеет следующий характер:

Температура нагрева, °С	900	1000	1100	1300
Относительное количество окалины	1	2	3,5	7

Совместная зависимость поверхностного угара для среднеуглеродистых сталей от температуры (в области 600-1150°С) и времени нагрева определяется соотношением

$$\alpha_{п} = 6,3\sqrt{\tau} \cdot e^{-\frac{9000}{t}},$$

где τ – время нагрева, мин; t – температура, °С.

Потери металла от угара при нагреве стальных слитков и заготовок приведены в табл. 1.12.

Таблица 1.12

Угар при нагреве заготовок в методических печах

Диаметр или сторона квадрата, мм	Продолжительность нагрева, ч	Угар	
		Поверхностный, г/см^2	По массе, %
100	3/1,3	0,18/0,13	0,9 / 0,65
150	4,4/2,2	0,45/0,13	1,5 /1,07
200	5,7 /2,9	0,93 / 0,6	2,1 / 1,52
250	7,5/3,6	1,13/3,6	2,35 / 1,65
300	8,5 / 4,3	1,36 / 0,97	2,5 / 1,8

Примечание. Значения в числителе даны для одностороннего нагрева, в знаменателе – при двустороннем нагреве.

Легирующие элементы в стали – никель, хром, вольфрам, ванадий, алюминий, кремний и другие – значительно снижают скорость окисления при нагреве. Они очень медленно диффундируют через слой окалины, образуя на поверхности плотные защитные пленки. Эти пленки даже при малой их толщине оказывают значительное сопротивление диффузии. Например, сталь с содержанием хрома около 22% практически не дает окисления (угара) при нагреве до 1000°С.

Обезуглероживание – процесс химического взаимодействия газов печной атмосферы с углеродом стали, находящимся в твердом растворе или в виде химического соединения Fe_3C. Обезуглероживание, как и окисление, осуществляется за счет двусторонней диффузии. Процесс обезуглероживания в обычных условиях нагрева выражается следующими реакциями:

$$Fe_3C + O_2 = 3Fe + CO_2,$$

$$Fe_3C + CO_2 = 3Fe + 2CO,$$

$$Fe_3C + H_2O = 3Fe + CO + H_2,$$

$$Fe_3C + 2H_2 = 3Fe + CH_4.$$

Процесс обезуглероживания сталей начинается при температурах выше 700°С и замедляется после появления на поверхности окалины. Интенсивность протекания процессов окалинообразования и обезуглероживания при различных температурах не одинакова. При температуре 700–1000°С более интенсивно происходит обезуглероживание, а при температуре выше 1000°С – окалинообразование. В табл. 1.13 приведены данные о глубине обезуглероженного слоя в зависимости от температуры и выдержки при печном нагреве стали.

Таблица 1.13

Глубина обезуглероженного слоя при нагреве сталей

Температура нагрева, °С	Выдержка, ч	Глубина обезуглероженного слоя в сталях, мм	
		хромоалюминиевая	углеродистая
900	1	0,15	--
900	2	0,30	--
1000	1	0,25	0,6
1000	2	0,35	0,7
1100	1	0,32	1,1
1100	2	0,45	1,6

Обедненная углеродом нагреваемая поверхность представляет собой переходный слой с постепенно меняющимся содержанием углерода от чистого феррита до здорового металла.

Окалинообразование и обезуглероживание при нагреве являются отрицательными явлениями в силу следующих обстоятельств:

1) при нагреве металла под ковку угар составляет 2–5% от массы заготовки, а в общем цикле кузнечной обработки потери от угара достигают до 7–8%;

2) появление окисленного слоя вызывает дополнительные затраты энергии на нагрев и удаление окалины;

3) окалина вызывает увеличенный износ инструмента;

4) ухудшается качество поверхности кованой или штампованной детали;

5) обезуглероживание приводит к снижению твердости поверхностных слоев, ухудшая механические свойства и уменьшая срок службы готового изделия.

Поэтому в кузнечно-штамповочных цехах предусматривают специальные меры для устранения или уменьшения угара и обезуглероживания. Резкое уменьшение угара и обезуглероживания достигается при нагреве в специальных печах с защитной атмосферой, такие печи широко применяются для нагрева под термическую обработку. Получил распространение и скоростной газовый нагрев в печах с температурой 1600–1700 °С. Газовый пламенный нагрев обеспечивает удобное и простое обслуживание печей, уменьшает габариты печи, повышает КПД и позволяет получать высокие скорости нагрева (в 10 раз больше обычных). При температуре печи 1300 °С продолжительность нагрева стальных заготовок снижается в два, а при 1400 °С – в четыре раза по сравнению с нагревом в печи при температуре 1200 °С. Во избежание перегрева и пережога металла пребывание заготовок в печи должно быть строго регламентировано. При этих условиях угар металла снижается в два и более раза в сравнении с обычными способами нагрева. В табл. 1.14 показаны продолжительность нагрева заготовок диаметром 100 мм до температуры 1200°С и угар металла при различных способах нагрева.

В табл. 1.15 приведены ориентировочные данные глубины обезуглероженного слоя в зависимости от температуры и выдержки при печном нагреве стали.

Таблица 1.14

Продолжительность нагрева и угар металла при различных способах нагрева

Способ нагрева	Продолжительность нагрева, мин	Потери от окисления, г/см^2	Толщина слоя окалины, мм	Соотношение потерь от окисления, %
Нагрев в пламенной печи с температурой 1250 °С	13,5	0,046	0,100	100,0
Нагрев в пламенной печи с температурой 1500 °С	3,5	0,022	0,075	47,0
Электронагрев индукционным способом	2,5	0,020	0,070	43,5

Таблица 1.15

Глубина обезуглероженного слоя

Температура, °С	Выдержка, ч	Глубина обезуглероженного слоя стали, мм		
		Углеродистая сталь	Хромистая сталь	Хромо-алюминиевая сталь
900	1	-	0,16	0,15
900	2	-	0,33	0,30
1000	1	0,6	0,25	0,25
1000	2	0,7	0,37	0,35
1100	1	1,1	0,35	0,32
1100	2	1,6	0,47	0,45

Интенсивность протекания процессов окалинообразования и обезуглероживания при различных температурах неодинакова. При температуре 700–1000 °С более интенсивным является процесс обезуглероживания, а при температуре выше 1000 °С – интенсивное окалинообразование.

1.4 Перегрев и пережог металла

Перегретым называется металл, имеющий в результате нагрева крупное зерно. Перегрев может получиться при температуре выше критической, если выдержка при этой температуре будет весьма продолжительной. Перегретая сталь имеет пониженные пластические свойства, и при ее ковке и штамповке со значительными степенями

деформации могут возникать трещины. Перегрев в сталях может быть исправлен термической обработкой (нормализацией) [10],[11].

Пережог (неисправимый брак) выражается в том, что при длительной выдержке при высоких температурах в окислительной печной атмосфере происходит окисление границ крупных зерен перегретого металла. Окислы нарушают связь между зернами, и при ковке и штамповке металл хрупко разрушается. Характерные черты пережога:

– выделение из нагретой стали искр;

– разрушение заготовки при первых же ударах молота при ковке или разрушение в штампе при штамповке;

– образование широких извилистых трещин на поверхности после травления.

В табл. 1.16 приведены данные о температурах пережога и максимальных температурах нагрева.

Таблица 1.16

Термическая температура пережога и максимальная температура нагрева

Сталь	Температура нагрева t_1, °С	Температура пережога t_2, °С	$\Delta t=t_2-t_1$, град
Углеродистая, содержащая С, %			
1,5	1050	1140	90
1,1	1080	1180	100
0,9	1120	1220	100
0,7	1180	1280	100
0,5	1250	1350	100
0,2	1320	1470	150
0,1	1350	1490	140
Кремнемарганцовистая пружинная 3%-ная	1250	1350	100
Никелевая (3% Ni)	1250	1370	120
Хромоникелевая (8%Cr)	1250	1370	120
Никелевая для цементации (5% Ni)	1270	1450	180
Хромованадиевая	1250	1350	100
Быстрорежущая	1280	1380	100
Аустенитная хромоникелевая	1300	1420	120

2 ВЫБОР ТЕМПЕРАТУРНОГО ИНТЕРВАЛА КОВКИ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

Одним из главных параметров технологических процессов ковки и штамповки является температурный интервал. Температурный интервал имеет верхний и нижний предел.

Верхний предел – это максимальная температура нагрева слитка или заготовки в печи перед ковкой $T_н$, она не совпадает с температурой начала обработки $T_{н.о}$ и всегда выше последней.

Это связано с тем, что при транспортировке металла из печи к кузнечно-штамповочному агрегату температура поверхностных слоев нагретого тела снижается за счет потерь тепла излучением, контактом с инструментом и конвекционными потоками, температура же внутренних слоев (особенно массивных слитков и заготовок) практически не изменяется.

Нижний предел температурного интервала – это температура поверхности поковки в момент окончания деформации на последнем переходе $T_{К.0}$.

Различают допустимый и рациональный (технологически необходимый) интервалы ковки.

Допустимый интервал является универсальной характеристикой деформируемого металла и зависит от его химического состава, структуры, физико-механических свойств. Основные закономерности назначения допустимого температурного интервала ковки или штамповки могут быть сведены к выполнению ряда рекомендаций.

1. На основании изучения диаграмм состояния (прил. 1) или конкретных физических свойств сплава определяется температура, характеризующая пережог металла T_s. Температура нагрева должна быть ниже температуры пережога.

2. По диаграмме рекристаллизации определяется возможная температура перегрева, характеризуемая резким ростом размера зерна за счет собирательной рекристаллизации. Соответственно, температура нагрева выбирается ниже температуры перегрева.

3. Проводятся горячие механические испытания для выявления зависимости прочностных и пластических характеристик от температуры. При наличии подобных сведений в нормативно-справочной документации или литературных источниках используют эти данные. По установленной зависимости показателей прочности и пластичности от температуры строят диаграммы пластичности. С их

помощью находят температуру наиболее высокой пластичности и относительно малого сопротивления деформации.

4. Путем сопоставления диаграмм пластичности и рекристаллизации выбирают температурную зону, в которой полностью прошли процессы рекристаллизации и структура металла состоит из однородных зерен требуемого размера. Эти значения температур служат для определения температуры конца обработки.

Приведенная методика является схематичной и может быть дополнена целым рядом других оценок, например, склонностью стали к обезуглероживанию, наличием фазовых превращений и др.

Рациональный температурный интервал устанавливают на основе допустимого интервала путем учета конкретных обстоятельств и факторов процесса ковки и штамповки. При этом, как правило, приходится учитывать комплекс взаимосвязанных факторов. К ним относятся:

1) размер и форма заготовки;

2) состояние металла перед ковкой (литой, деформированный);

3) вид ковочной или штамповочной операции, механическая схема деформации (осадка, вытяжка, прошивка и т.д.);

4) применяемое оборудование, его расположение в цехе (молот, пресс, тип нагревательного устройства, расстояние от печи до кузнечного агрегата, уровень механизации и т.д.);

5) требования к качеству и свойствам поковки, наличие термической обработки.

Допустимый и рациональный интервалы могут различаться между собой, поскольку последний учитывает и отражает конкретные условия проведения операций ковки и штамповки. В табл. 2.1 приведены температурные интервалы ковки заготовок для конструкционных, инструментальных, жаропрочных, коррозионно- и износостойких сталей и сплавов [10-13].

Термомеханические параметры ковки и штамповки цветных металлов и сплавов (температура начала и конца ковки, допустимые деформации, скорость деформации и т.д.) устанавливают на основе тех же закономерностей, рассмотренных выше, в сочетании с результатами комплекса испытаний, характерных для этой группы сплавов [4-5].

Температурные интервалы ковки и штамповки ряда цветных металлов и сплавов, допустимые степени деформации в зависимости от применяемого оборудования приведены в табл. 2.2–2.5

Таблица 2.1

Температурные интервалы ковки сталей и сплавов различного назначения

Назначение стали (сплава)		Марка стали (сплава)	Максимальная температура нагрева металла перед ковкой, °С		Минимальная температура окончания ковки, °С			
					Интенсивное обжатие		Проглаживание	
			Слиток	Заготовка	Слиток	Заготовка	Слиток	Заготовка
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Стали конструкционные	Общего назначения	СтО	1280	1300	750	700	700	700
		Ст2сп, Ст 2пс, Ст2кп, СтЗпс, СтЗсп, СтЗкп	1280	1300	750	750	700	700
		Ст5сп,Ст5пс	1260	1260	750	750	700	700
		Ст6сп ,Стбпс	1250	1250	780	780	700	700
	Углеродистые качественные	10, 10кп, 15, 15кп	1280	1300	780	780	700	700
		20, 25, 30,35	1280	1280	750	750	700	700
		40	1250	1250	780	800	700	700
		45	1250	1250	780	750	700	700
		50	1250	1250	800	800	700	700
		55	1240	1240	800	800	730	730
		60	1220	1220	800	800	700	700
	Легированные	15Х,20Х, 20К, 22К	1260	1260	800	750	700	700
		35Х,40Х	1250	1250	800	800	700	700
		45Х.50Х	1220	1250	800	780	700	760
		20Г	1260	1260	800	750	700	700
		30Г,40Г	1220	1250	800	800	750	760
		50Г	1220	1250	800	780	750	760
		10Г2	1200	1250	750	800	750	780
		45Г2	1200	1200	800	800	750	750
		50Г2	1200	1200	830	800	760	760
		20ХН	1200	1250	850	860	780	800
		40ХН	1220	1250	800	860	700	800
		45ХН	1220	1200	800	800	750	700
	Легированные теплоустойчивые	50ХН	1220	1200	800	800	700	700
		I2ХН2	1230	1250	820	860	760	800
		12ХН3А, 20ХН3А, 30ХН3А	1220	1220	800	800	750	750
		12Х2НЧА	1220	1200	850	800	850	750
		20Х2НЧА	1200	1200	800	800	700	700
		38ХС	1200	1200	800	800	700	700
		30ХМ,30ХМА	1220	1260	800	800	700	760
		35ХМ	1220	1260	800	800	700	760
		40ХФА	1220	1250	800	860	750	800
		36Х2Н2МФА	1180	1240	780	780	700	700
		38ХН3МФА	1180	1180	780	780	780	780

Окончание табл. 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
		18ХГТ	1220	1200	800	800	750	700
		30ХГС, 30ХГСА	1240	1240	800	800	700	700
		35ХГСА	1200	1250	800	860	700	800
		38ХГН	1200	1200	800	800	700	700
		34ХН1М, 34ХН3М, 34ХН3МА	1240	1240	800	780	700	700
		38Х2Н2МА, 40ХН2МА, 18Х2НЧМА	1200	1220	800	800	700	700
		15ХМ	1260	1260	800	750	700	700
		12Х1МФ, 20Х3МВФ	1240	1240	800	780	700	700
		25Х1МФ	1220	1180	850	850	850	850
		15Х5М (Х5М)	1200	1200	800	800	750	750
	Подшипниковые	ШХ15, ШХ15СГ	1150	1150	800	800	720	720
Стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие, жаропрочные, износостойки		08Х13	1220	1200	850	850	850	850
		12Х	1230	1230	850	850	800	800
		20Х13, 30Х13	1250	1250	850	850	750	750
		10Х17Н13М2Т	1180	1180	850	850	850	850
		10Х17Н13М3Т, 45Х14Н14В2М	1160	1160	850	850	850	850
		12Х18Н9, 12Х18Н12Т, 17Х18Н9	1200	1200	850	850	800	800
		12Х18Н9Т, 08Х18Н10. 12Х18Н10Т	1200	1200	850	850	850	850
		08Х18Н10Т	1180	1220	900	960	850	900
		40Х9С2, 18Х12ВМБФР	1200	1200	850	850	850	850
		15Х12ВНМФ, 20Х12ВНМФ	1230	1230	900	900	850	850
		37Х12Н8Г8МФБ	1170	1220	850	950	800	900
		20Х20Н14С2, 20Х25Н20С2	1170	1170	850	850	800	800
		20Х23Н13, 20Х23Н18	1220	1220	900	900	800	800
		ХН35ВТ	1170	1170	850	850	850	850
		ХН35ВТЮ	1110	1110	900	900	900	900
		ХН78Т	1220	1220	850	850	850	850
		ХН77ТЮР, ХН80ТБЮ, ХН70ВМЮТ	1180	1180	900	800	900	900
		ХН70ВМТЮ	1170	1180	950	950	950	950

Таблица 2.2

Термомеханические параметры ковки и штамповки алюминиевых сплавов

Сплав	Температурный интервал ковки и штамповки, °С		Применяемое оборудование	Допустимые деформации, %	
	начало	конец		молот	пресс
АМЦ, АМГ, АВ, АК6, АД31, АД33	470 - 420	350	Молот, пресс	АМЦ и АМГ 80 и более АК6 и др. Литой 40-50 Литой 50 Деформированный 50-60 до 80	
Д1, АК8, ВД17	470-440 450-420	400 380	Пресс Молот	Литой 40 до 50 Деформированный 50-70 до 70	
АК2, АК4, АК4-1, АМГ6	470-420 430-400	350 320	Молот, пресс	50-60	60
В92, В96, В93	430-400 400-370	350 320	Пресс Молот	Литой 30-40 40-50 Деформированный 50 – 60 80	

Таблица 2.3

Термомеханические режимы ковки магниевых сплавов на молотах и прессах

Марка сплава	Температура ковки, °С				Максимально допустимая деформация за нагрев при осадке, %	
	Молот		Пресс			
	начало	конец	начало	конец	молот	пресс
МАІ, МА2, МА8	430	340	420	300	60	80
МА2-1	420	340	400	300	50	70
МА3, МА5	400	300	390	280	35	60
ВМ65-1	410	340	400	300	60	75
МА13, ВМД1	480	400	450	380	50	70
ВМ17	420	350	400	340	45	65

Таблица 2.4

Термические режимы ковки и горячей штамповки основных титановых сплавов

Сплав	Температурный интервал, °С			
	Структура сплава	Свободная ковка	Штамповка	
			на прессах	на молотах
ВТ1	α	950 - 700	950 - 700	1000 - 700
ВТ5		1080 - 850	1100 - 850	1100- 850
ВТ5-1		1050 - 850	1050 - 850	1080 - 850
ОТ4-1		1000 - 800	950 - 800	1020 - 800
ОТ4		1000 - 800	950 - 800	1020 - 800
ОТ4-2	Псевдо-α	1000 - 800	950 - 800	1020 - 800
ВТ4		1020 - 850	1000 - 800	1030 - 850
ВТ6	(α+β)	980 - 850	960 -800	980 - 800
ВТ8		1020 - 850	1000 - 850	1040 - 850
ВТ3-1		1000 - 850	980 - 850	1030 - 850
ВТ15	Псевдо-β	-	900 - 870	1000 - 900

Таблица 2.5

Термические режимы ковки и горячей штамповки некоторых медных сплавов

Сплав	Температурный интервал		
	Свободная ковка	Штамповка	
		На прессах	На молотах
Л80	820-650	820-650	820-650
ЛС59	750-600	750-600	800-600
БрАЖН10-4-4	860-700	850-700	820-700
БрАЖ 9-4	850-700	850-700	850-700
БрАЖМц10-3-1,5	840-690	850-680	850-700

2.1 Режимы нагрева заготовок

2.1.1 Нагрев в печах

Правильно выбранный режим нагрева должен обеспечить:

– необходимую температуру нагрева за минимально допустимое время;

– равномерное распределение температуры по поверхности сечения заготовки;

– минимальное окисление и обезуглероживание поверхности; отсутствие микро- и макроразрушений в теле заготовки.

Основными технологическими параметрами режима нагрева являются скорость нагрева $V_н$, град/ч (мин) и общая продолжительность нагрева $\tau_н$, град/ч (мин). Различают технически возможную и допустимую скорости нагрева. Технически возможная скорость нагрева зависит от конструкции и тепловой мощности печи, физической природы нагреваемого металла, условий передачи теплоты металлу и условий теплопередачи внутри заготовки или слитка. Под допустимой скоростью нагрева понимают скорость нагрева, ограниченную физико-механическими свойствами металла, а также возникновением термических напряжений, наличием фазовых превращений при нагреве.

Общая продолжительность нагрева складывается из времени нагрева поверхностных слоев до необходимой температуры $\tau_{нп}$ и времени выдержки для выравнивания температур между поверхностью и сердцевиной $\tau_в$

$$\tau_н = \tau_{нп} + \tau_в.$$

Нагрев обычно производят с переменным тепловым потоком, поэтому по времени его разделяют на несколько периодов. Так, при нагреве заготовок из средне- и высокоуглеродистых сталей и сложно легированных сплавов выделяют три периода:

1) медленный нагрев в условиях возникновения термических напряжений;

2) форсированный нагрев, когда металл перешел в пластическое состояние;

3) выравнивание температур между сердцевиной и поверхностью.

Взаимосвязь различных факторов, определяющих скорость нагрева $V_Н$, перепад температур между поверхностью и сердцевиной $\Delta\tau_Н$, продолжительность выдержки $\tau_в$, приведены в табл. 2.6.

Коэффициент температуропроводности α характеризует распространение тепла внутри нагреваемого тела, $м^2/ч$

$$\alpha = \lambda/\gamma c,$$

где λ – коэффициент теплопроводности, ккал/м·час·град, с – теплоёмкость ккал/кг·град, γ – удельный вес, $кг/м^3$.

Таблица 2.6

***Физические закономерности при нагреве и выдержке металла в нагревательных устройствах* [14]**

Параметры	Зависимость	
	прямая	обратная
Скорость нагрева $V_н$	От внешних условий: а) потока тепла через 1 м^2 поверхности металла в ед. времени q, ккал/м^2; б) коэффициента теплопередачи α, ккал/м^2 ·ч ·град	От требуемого количества тепла, Q ккал/ч
	От физико-механических свойств:	
	а) коэффициента температуропроводности a, м^2 /ч; б) допустимого напряжения σ, кг/ мм^2	а) коэффициента линейного расширения β, мм/м·град; б)модуля упругости E, кг/мм^2
	От формы заготовки: отношения поверхности к объему F/V	От размеров сечения x^2, R^2
Разность температур $\Delta t_Н$	От внешних условий: а) скорости нагрева $Vн$, б) потока тепла q От размеров сечения x^2, R^2	
Продолжительность выдержки $\tau_в$	От физико-механических свойств:	
	допустимого напряжения σ	коэффициента температуропроводности a
	От размеров сечения x^2, R^2	От физических свойств коэффициента температуропроводности a

Теплоемкость металла возрастает с повышением температуры и в диапазоне 20 – 1200 °С для углеродистой стали примерно равна 0,11 – 0,16 ккал/кг·град. Теплоемкость легированных сталей выше теплоемкости углеродистых.

Существует несколько подходов к определению необходимого времени нагрева. Расчетно-аналитические методы основаны на принятии определенной модели процесса нагрева и учитывают переменные условия теплообмена, изменение физических свойств металла при нагреве, изменение структуры и т.д. Однако весь существующий при нагреве комплекс факторов не может быть достаточно точно учтен в аналитических расчетах, а сами расчетные выражения носят сложный характер. Поэтому в производственной практике используют приближенные эмпирические формулы или данные, полученные опытным путем, в виде графиков или таблиц [9,11].

При нагреве в пламенных печах слитков и заготовок из углеродистых и легированных сталей для расчета времени нагрева довольно часто используют формулу Н.Н. Доброхотова

$$\tau_н = kb \cdot D\sqrt{D},$$

где $\tau_н$ – общее время нагрева, ч; k – коэффициент, учитывающий материал нагреваемой заготовки, приближенно k = 10 для углеродистых сталей и k = 20 для высоколегированной стали; b – коэффициент, учитывающий расположение нагреваемых заготовок в печи, его значение определяется из рис. 2.1. D – диаметр или сторона квадрата заготовки, м.

При определении продолжительности нагрева заготовок и слитков небольшого сечения (до величины D =300–350 мм) в методических печах можно пользоваться приближенной формулой:

$$\tau = KD,$$

где значения коэффициента K составляют: для углеродистых сталей ...0,1-0,15; легированных конструкционных сталей ...0,15-0,2; высоколегированных и инструментальных сталей ...0,3-0,4.

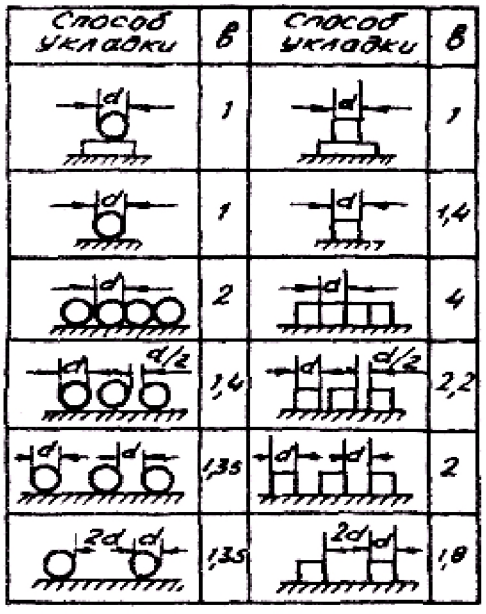


Рис.2.1. Коэффициент b в зависимости от способа расположения заготовок в печи

Режимы нагрева слитков и заготовок из предварительно деформированного металла различаются между собой. При нагреве наружный слой слитка приобретает более высокую температуру, чем

сердцевина. Этот слой стремится расшириться, чему препятствует срединная часть, в результате образуются опасные радиальные напряжения растяжения.

Слиток, имея малую пластичность вследствие литой структуры и неметаллические включения, пузыри, нерастворимые карбиды, играющие роль концентраторов, под действием возникающих напряжений очень склонен к образованию трещин. Кроме того, нагрев слитков происходит более неравномерно за счет их значительных размеров и неодинакового поступления тепла от стен, свода и пода печи. Поэтому для слитков чаще всего применяют многоступенчатый нагрев. Заготовки представляют собой деформированный металл, а размеры их меньше, чем у слитков, поэтому и режимы нагрева у заготовок менее сложны. Широко практикуется одноступенчатый нагрев мелких и средних заготовок с любой допускаемой скоростью нагрева. При этом допускаются более значительные перепады температур между поверхностью и сердцевиной, чем при нагреве слитков.

Характерные режимы нагрева слитков и заготовок приведены в табл. 2.7 -2.11.

Таблица 2.7

Продолжительность нагрева (в минутах) деформированных заготовок из углеродистой конструкционной стали при одиночном расположении в печи

Диаметр или сторона квадрата, мм	Температура рабочего пространства,°С									
	1200				1300				1400	
	Конечная температура нагрева заготовок,°С, не более									
	1100		1150		1200		1250		1200	
	Профиль заготовки									
	круглый	квадрат	круглый	квадрат	круглый	квадрат	круглый	квадрат	круглый	квадрат
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
10	2,5	3,0	3,0	3,5	2,0	2,5	2,0	3,0	1,0	1,5
20	4,5	5,5	6,0	7,5	3,0	4,5	4,0	5,0	1,5	2,0
30	7,0	9,0	8,5	11,0	5,0	6,0	6,0	8,0	2,5	3,0
40	10,0	13,0	11,5	14,5	6,5	8,0	8,0	10,5	3,5	4,5
50	12,5	16,0	15,0	19,5	8,0	10,5	10,5	13,5	4,5	5,5
60	15,0	19,5	18,0	23,5	10,0	13,0	12,5	16,0	5,0	6,5
70	16,0	22,5	21,0	27,0	12,0	15,0	14,5	19,0	6,0	7,5
80	20,5	26,5	24,5	31,5	14,0	17,5	16,5	22,0	7,0	9,0
90	23,5	30,5	27,5	35,5	16,0	20,0	19,0	24,5	8,0	10,5
100	26,0	33,5	31,0	40,0	18,0	23,0	21,0	27,5	9,0	11,5
110	29,5	38,0	35,0	45,5	20,0	26,0	23,5	30,5	10,5	13,5
120	32,5	41,5	38,5	50,0	22,5	29,5	26,0	33,5	12',0	15,0

Окончание табл. 2.7

1	2	3	4	5	6	6	7	8	8	10
130	36,0	46,5	42,5	55,0	25,0	32,5	29,0	38,0	13,0	16,5
140	39,0	50,5	46,0	59,5	27,5	36,0	32,0	41,5	14,0	18,0
150	42,5	55,0	50,0	65,0	30,0	32,0	35,0	45,5	15,5	20,0
160	46,0	59,9	54,5	71,0	33,0	43,0	38,5	50,5	16,5	21,5
170	50,0	64,5	58,5	76,0	36,0	47,0	42,0	54,5	18,0	23,0
180	54,0	70,0	63,0	81,5	39,5	51,5	46,0	59,5	19,5	25,0
190	58,0	75,0	68,0	88,0	42,5	55,5	49,5	64,0	21,0	27,0
200	62,5	81,0	72,5	94,0	46,0	60,0	53,5	69,0	22,5	29,0

Примечания: 1. Для инструментальной, углеродистой и среднелегированной стали продолжительность нагрева увеличивается на 25-30%, для высоколегированных сталей – на 30-50%.

2. Для учета влияния длины заготовки время нагрева умножают на коэффициент m в зависимости от отношения длины L к размеру сечения D или a :

L/D не менее	3,0	2,	1,5	1,0
коэффициент m	1,0	0,98	0,92	0,71

Таблица 2.8

Рекомендуемый режим нагрева слитков и заготовок из углеродистых и легированных сталей [15]

Группа	Тип стали	Сталь	Температура нагрева, °С	Удельная продолжительность нагрева, мин/см			
				Заготовка квадратная со стороной, мм		Сторона (диаметр) слитка	
				50-150	>150	до 350 мм (1 m)	более 350 мм (>1m)
1	2	3	4	5	6	7	8
I	Технически чистое железо	–	1300–1320	Не ограничена			
II	Углеродистая и низколегированная (до 0,25% С)	08–25, 15А–25А, и 15Г, 20Г, 15Х, 20Х, 10Г2, 15ХГ, 20ХГ, 15ХФ, 15ХМ, 20ХГСА	1220–1240	5,0	6,0	7,5	10,0
III	Углеродистая и низколегированная (до 0,45% С)	30–40, 30 Г– 40Г, 30Г2, 45Г2, 30Х– 40Х, 40ХГ, 35ХМ	1200–1220	5,0	6,0	7,5	10,0
IV	Углеродистая, низко- и среднелегированная (до 0,65% С)	50–60, 50Г, 65Г, 50Г2, 50Х, 50ХГ, 55СГ, ШХ10, 55С2, 60С2, 50ХФА, 30ХГ3, 25ХНВА, 35Х ГСА	1180–1200	6,0	7,5	10,0	12,5

Окончание табл. 2.8

1	2	3	4	5	6	7	8
V	Углеродистая и среднелегированная (до 0,9% С)	У7, У8, 70– 85, У7А, 70Г, У8ГА и т. д.	1140–1160	6,0	7,5	10,0	12,5
VI	Углеродистая и легированная инструментальная и шарикоподшипниковая	У 9, У 10, У10А, 7Х3, 9ХС,ХВГ, В1, Х, ШХ6-ШХ15, 6Х2– ЕХ3	1120–1140	7,5	10,0	12,5	15
VII	Углеродистая и легированная инструментальная и высокомарганцевая	У12,У13, У12Г,ХГ, Х12,Х12М, ХВ5	1100–1120	7,5	10,0	12,5	15
VIII	Нихромы и нержавеющие	Х15Н60, Х18Н10Т, 2Х18Н9Т	1200–1220	10	12,5	12,5	15
IX	Быстрорежущие	Р9, Р18	1180–1200	15	17,5	20	20

Таблица 2.9

Продолжительность (в часах) нагрева холодных стальных заготовок до ковочной температуры в пламенных печах

Размер сечения, мм	Температура печи при посадке, ^{O}С	Выдержка при температуре посадки	Нагрев до температуры ковки	Выдержка при температуре ковки	Общая выдержка
Низкоуглеродистые и низколегированные					
201 – 250	1250	-/0,5	1,0/2,0	0,5/1,0	1,5/3,5
251 – 300	1250	-/0,5	1,5/2,5	0,5/1,0	2,0/4,0
301 – 350	1250	-/1,0	2,0/3,5	0,7/1,5	2,7/6,0
Среднеуглеродистые и легированные					
201 – 250	1150	0,5/1,0	1,5/3,0	0,5/1,0	2,5/5,0
251 – 300	1150	0,5/1,0	2,0/3,5	0,5/1,5	3,0/6,0
301 - 350	1150	0,5/1,0	2,5/4,0	0,5/2,0	3,5/7,0
Высокоуглеродистые, высоколегированные, жаропрочные					
201 – 250	700	0,5/1,0	2,5/5,0	0,5/1,0	3,5/7,0
251 – 300	700	0,5/1,0	3,0/5,0	0,5/2,0	4,0/8,0
301 – 350	700	0,5/1,0	3,0/5,0	1,0/3,0	4,5/9,0

Таблица 2.10

Продолжительность (в часах) и режим нагрева под ковку быстрорежущих сталей Р9, Р18, Р6М5, Р9М4К8

Средний диаметр слитка (заготовки), мм	Масса слитка, т	Температура печи при посадке, °С	Выдержка при температуре посадки	Нагрев до 850 - 900 °С	Выдержка при 850 -900 °С	Нагрев до температуры ковки	Выдержка при температуре ковки	Общее время
50	-	450	0,5	1,0	0,5	0,2	-	2,2
70	-	450	0,5	1,2	0,8	0,3	0,1	3,0
100	-	450	0,8	1,6	1,4	0,5	0,2	4,5
150	-	450	1,2	2,0	2,0	0,8	0,5	6,5
200	0,2	450	1,5	2,8	3,6	1,0	0,6	8,5
300	0,6	400	2,5	4,0	4,0	1,2	0,8	12,5
400	1,0	350	3,0	5,5	5,0	1,6	1,4	16,5

Таблица 2.11

Данные для расчета ориентировочного времени нагрева алюминиевых, магниевых и медных сплавов

Сплавы	Диаметр или толщина заготовки, мм		
	До 50	От 50 до 100	Св. 100
	Время нагрева τ, мин на 1 мм диаметра (толщины)		
Алюминиевые и магниевые	τ = 1,5	τ = 1,5 + 0,0 1(D – 50)	τ = 2,0
Медные	τ = 0,75	τ = 0,75 + 0,06 (D – 60)	τ = 1,0

2.1.2 Индукционный нагрев

Индукционный нагрев осуществляется за счет теплоты, которая выделяется в металлической заготовке, помещенной в электромагнитное поле переменного электрического тока [15].

Сквозной нагрев металла под ковку и штамповку может быть произведен токами промышленной повышенной и высокой частоты. Глубина проникновения тока в нагреваемую заготовку определяется по формуле:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \gamma}},$$

где $\omega = 2\pi f$; f – частота тока, Гц; μ – магнитная проницаемость, Гн/м; γ – удельная электропроводность материала, 1/Ом.

Эффективность сквозного индукционного нагрева в основном зависит от правильно выбранного соотношения между частотой тока и диаметром заготовки. Это видно из рассмотрения графика зависимости КПД нагрева от отношения диаметра заготовки к глубине проникновения тока (рис. 2.2). Полный КПД определяется тепловым и электрическим коэффициентами индукционного нагрева:

$$\eta_{полн} = \eta_{эл} \cdot \eta_{тепл}.$$

Электрический КПД возрастает при повышении частоты тока, а тепловой, наоборот, падает. Если глубина проникновения тока больше диаметра заготовки (слишком низкая частота), то электрический, а вслед за ним и полный КПД падают, так как только часть электромагнитной энергии поглощается заготовкой.

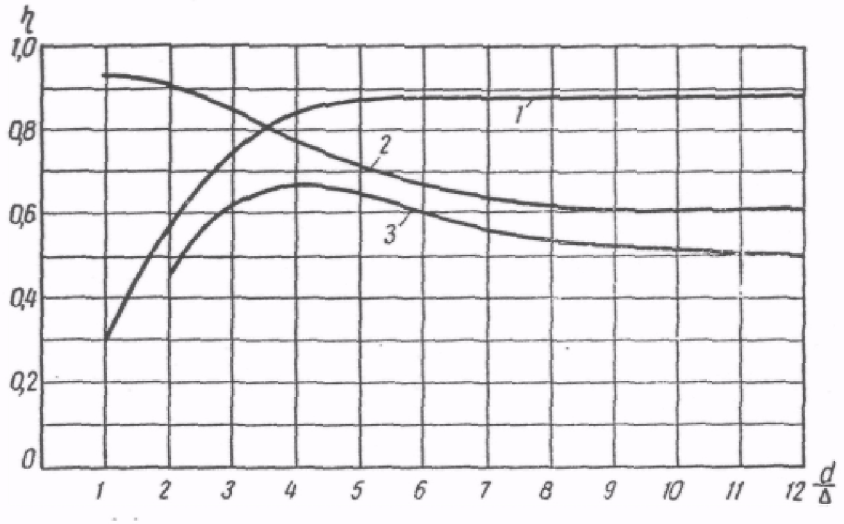


Рис. 2.2. Зависимость КПД индукционного нагревательного устройства от отношения диаметра заготовки к глубине проникновения тока в нагретую сталь: *1* – электрический КПД; *2* – тепловой КПД; *3* – полный КПД

Разница в температуре сердцевины и поверхности заготовки, нагретой под обработку давлением, не должна превышать 50° (если в

конце нагрева эта разница составляет 100°, то к моменту деформации – через 10–15 с – она уменьшается до величины 20–50°, обычно допускаемой при нагреве в пламенных печах). При применении слишком высокой частоты (глубина проникновения тока мала) сквозной прогрев более продолжителен. При этом возрастают потери на излучение; тепловой, а следовательно, и полный КПД падают. Тепловой КПД тем выше, чем больше глубина проникновения тока, чем меньше объем металла, нагреваемого за счет теплопроводности. Поэтому отношение диаметра заготовки к глубине проникновения тока следует подбирать таким, чтобы полный КПД нагрева имел максимально возможное значение (рис. 2.4). Практически это отношение может колебаться в пределах 2,5–6. Для заготовок различных диаметров должны быть применены стандартные частоты, приведенные в табл. 2.12.

Таким образом, при нагреве заготовок диаметром до 20 мм рационально применять ламповые генераторы, а заготовок большего диаметра – машинные.

Таблица 2.12

Частоты, рекомендуемые для заготовок различных диаметров

Диаметры заготовок, мм	Частота тока, Гц
120—300	50
70—160	500
50—120	1000
30—80	2500
15— 40	8000
5—20	радиочастота

Время сквозного нагрева металла при заданной разнице в температуре поверхности и сердцевины поковки может быть подсчитано теоретически или определено на основании опытных данных. В табл. 2.13 приведены данные о продолжительности нагрева в зависимости от частоты тока, мощности установки и размеров заготовки.

Таблица 2.13

Продолжительность индукционного нагрева заготовок до ковочной температуры

Диаметр заготовки, мм	Принятый расход электроэнергии, кВт-ч на кг	Наименьшее технологически допустимое время индукц. нагрева, мин	Длина заготовки, мм								
			80	100	125	160	200	250	320	400	500
			Время нагрева1 заготовки, мин.								
Частота 8000 Гц, мощность установки 100 кВт											
20	0,50	0,03	0,07	0,08	0,1	0,13	0,16	0,2	–	–	–
30	0,49	0,1	0,14	0,18	0,22	0,29	0,36	0,45	0,58	–	–
40	0,48	0,2	0,25	0,31	0,39	0,45	0,62	0,78	1	1,25	–
50	0,46	0,5	—	0,47	0,58	0,75	0,94	1,17	1,5	1,87	2,34
Частота1000 — 2500 Гц, мощностьустановки 100 кВт											
60	0,49	1	–	–	–	1,04	1,3	1,47	2,09	2,58	3,24
80	0,47	2	–	–	–	1,78	2,25	2,8	3,55	4,5	5,6
100	0,45	3	–	–	–	2,65	3,35	4,15	5,3	6,64	8,3
120	0,43	4	–	–	–	3,65	4,6	5,7	7,3	9,2	–
140	0,40	5,8	–	–	–	–	5,8	7,3	9,3	–	–
Промышленная частота, мощность установки 200 кВт											
160	0,48	6,2	–	–	–	–	–	–	7,3	9,1	11,4
180	0,46	6,6	–	–	–	–	–	6,9	8,8	11	13,8
200	0,44	7	–	–	–	–	6,5	8,2	10,3	13	–
250	0,41	9	–	–	–	–	9,5	11,8	15,2	–	–
300	0,38	11	–	–	–	10,1	12,6	15,8	–	–	–

Примечания: 1. При нагреве легированной стали табличное время умножается на 1,15; при нагреве немагнитной стали – на 1,2–1,3; при нагреве квадратных заготовок – на 1,25.

2. При увеличении или уменьшении и мощности установки табличное время пропорционально уменьшается или увеличивается.

3. При нагреве заготовки квадратного сечения сторону квадрата рекомендуется рассматривать как диаметр цилиндрической заготовки; заготовки прямоугольного сечения – меньшую сторону как диаметр цилиндрической заготовки; трубчатой заготовки –толщину стенки как радиус цилиндрической заготовки.

2.2 Режимы охлаждения заготовок

Охлаждение слитков и заготовок начинается сразу после выдачи их из печи и происходит при транспортировке металла к кузнечному агрегату, в процессе ковки или штамповки и, наконец, после обработки давлением, когда температура металла снижается до температуры окружающего пространства.

Во время охлаждения поверхностные слои поковки теряют тепло быстрее внутренних, что приводит к появлению дополнительных напряжений – растягивающих у поверхности и сжимающих в сердцевине поковки. В связи с разницей в температуре структурные превращения происходят неодновременно по объему поковки, что также вызывает появление дополнительных напряжений. Дополнительные напряжения тем больше, чем выше скорость охлаждения. Эти напряжения могут превысить прочность металла и привести к образованию наружных и внутренних макро- и микротрещин. Медленное охлаждение стали, начиная с температуры 700–800° С, способствует выравниванию температуры по объему поковки и снижению дополнительных тепловых напряжений.

Внутренние трещины (флокены) образуются в сталях, насыщенных водородом, который развивает в отдельных микрообъемах давления, превышающие прочность металла. Медленное охлаждение, начиная с температуры 800–900° С, способствует диффузионному удалению водорода из флокеночувствительной стали.

Выбор условий охлаждения поковок зависит от их материала и размеров. Чем ниже теплопроводность металла, тем более опасны для него тепловые напряжения, тем меньше допускаемая скорость его охлаждения. Данные об охлаждающей способности различных сред представлены в табл. 2.14.

Таблица 2.14

Охлаждающая способность различных сред

Охлаждающая среда	Скорость охлаждения в °С/с в интервале температур	
	550 – 650°	200-300°
Вода при 18°С	600	270
Минеральное машинное масло	100	15 – 18
Спокойный воздух	0,135	0,035

В зависимости от материала поковок и требований, предъявляемых к ним, применяются следующие способы охлаждения:

1. Охлаждение металла вместе с печью (наиболее низкая скорость охлаждения). Начальная температура печи поднимается до 650–700°С. При этом охлаждение высоколегированных инструментальных и конструкционных сталей в интервале температур 700–400°С производится со скоростью 25°/ч; 400–100° С– 15°/ч.

2. Охлаждение металла в ящиках или колодцах может производиться с засыпкой их сухим песком, шлаком или золой либо без засыпки.

3. Охлаждение металла на воздухе производится на стеллажах при укладке индивидуально, навалом или штабелем. При этом получается некоторая разница в скорости охлаждения. В табл. 2.15 приведены сведения о падении температуры при охлаждении поковок на стеллажах в один ряд при температуре воздуха 16°.

Таблица 2.15

Марка стали	Условия охлаждения при различных размерах заготовок, мм				
	до 100	101 – 200	201– 300	301 – 400	401 – 500
15	В	В	В	В	В
20	В	В	В	В	В
30	В	В	В	В	В
35	В	В	В	В	В
40	В	В	В	В	В
45	В	В	В	В	В
50	В	В	В	В	Я
У7, У8	Ш	Я	Я	ПЯ	
У9, У10	Я	Я	ПЯ	П	
У12	ПЯ	ПЯ	П		
30Г2	В	В	Ш	Ш	Ш
50Г2	В	Ш	Ш	Ш	ПЯ
50ХГ	Ш	Я	П	П	П
30Х	Ш	Я	П	П	П
ШХ-15	ВШ	ВП	ВП	ВП	ВП
40ХН	ПЯ	П	П	П	П
12ХН2А	Я	ПЯ	П	П	
1Х189Т	П	П	П	П	П
1Х13,3Х13	П	П	П	П	П

Обозначено: В – охлаждение на воздухе; ВШ – охлаждение на воздухе до 600°, а потом в штабелях; ВП – на воздухе, а потом в печи; Ш – охлаждение в штабелях; Я – охлаждение в яме; П – охлаждение в печи.

4. Охлаждение металла в воде – подстуживание (наиболее высокая скорость охлаждения) может быть применено при снижении температуры до ~ 700° в целях удаления окалины (для сталей, не дающих пороков охлаждения при любых скоростях охлаждения) или в целях избежания цементитной сетки (для высокоуглеродистых и высоколегированных сталей).

3 ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛЬНЫХ ПОКОВОК И ШТАМПОВОК

3.1 Назначение, основные виды и структура, получаемая в процессе проведения предварительной термической обработки

Термическая обработка широко применяется как для готовых стальных изделий (инструмент, детали машин и др.), так и для полуфабрикатов (поковок, штамповок).

Поковки и штамповки, как правило, являются заготовками для последующей обработки резанием, шлифованием, пластическим деформированием, а также для окончательной термо- или химико-термической обработки.

Такие полуфабрикаты характеризуются целым рядом особенностей:

1) неоднородностью механических свойств;

2) неравномерностью величины зерна в различных зонах поковок;

3) перегревом штампованных заготовок особенно из высоколегированных сталей, что ведет к крупнозернистости и термическим напряжениям, возникающим в процессе охлаждения;

4) образованием неравновесных структур с повышенной твердостью при ускоренном охлаждении (особенно у мелких поковок из высоколегированных сталей);

5) возникновением карбидной сетки по границам зерен высокоуглеродистых сталей в условиях медленного охлаждения крупных поковок при высоких температурах окончания ковки.

В связи с этим поковки и штамповки в большинстве случаев подвергаются предварительной термической обработке (ПТО).

Она обеспечивает:

1) лучшую обрабатываемость резанием или пластическим деформированием за счет перекристаллизации структурных составляющих сплавов;

2) снятие остаточных напряжений;

3) исправление перегрева, приводящего к крупнозернистости;

4) предупреждение флокенообразования (внутренних трещин) в крупных поковках из легированных сталей;

5) подготовку структуры для окончательной термической обработки.

При выборе режимов предварительной термообработки учитываются её назначение, марка (химический состав) обрабатываемого материала, его исходная структура, определяемая термомеханическим режимом при ковке-штамповке, толщина и габариты поковок.

Основными видами термической обработки поковок являются отжиг, нормализация, закалка и отпуск [1, 9, 16, 17].

Отжиг – процесс нагрева до температур выше критических и последующего медленного охлаждения, при котором образуется устойчивая структура, свободная от остаточных напряжений. В применение к кованым и штампованным изделиям различают отжиг полный, неполный, низкий, гомогенизирующий и сфероидизирующий (рис.3.1).

При полном отжиге сталь нагревается на 20–50° выше критической температуры A_3 (прил.2), после чего дается медленное охлаждение (в печи) до температуры 500–650° для полного распада аустенита; металл поковки становится мягким и вязким, получает мелкозернистую феррито-перлитную структуру, освобождается от остаточных напряжений. В некоторых случаях исправление структуры достигается двойным отжигом, причем первый нагрев производится до температуры примерно 950°. Полному отжигу в большинстве случаев подвергаются доэвтектоидные стали (прил.4).

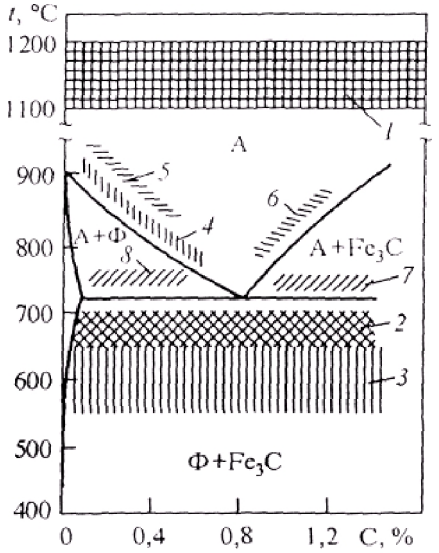


Рис. 3.1. Диаграмма состояния Fe– Fe_3C, на которой нанесены температурные интервалы различных видов отжига: *1* – гомогенизация; *2* – низкотемпературный отжиг (высокий отпуск для снижения твердости и рекристаллизационный отжиг; *3* – отжиг (отпуск) для снятия напряжений; *4* – полный отжиг с фазовой перекристаллизацией; *5* – нормализация доэвтектоидных сталей; *6* – нормализация заэвтектоидной стали для разрушения цементитной сетки; *7* –сфероидизация; *8* – неполный отжиг доэвтектоидной стали

Неполный отжиг осуществляется при температуре, несколько выше критической A_1, и применяется преимущественно для заэвтектоидных сталей (прил.4). При этом снимаются остаточные напряжения, снижается твердость, улучшается обрабатываемость. Цементитная сетка в стали может быть снята только при комбинации двух видов обработки – нормализации и неполного отжига. Надежным способом избежания цементитной сетки является окончание ковки или штамповки при несколько заниженной температуре.

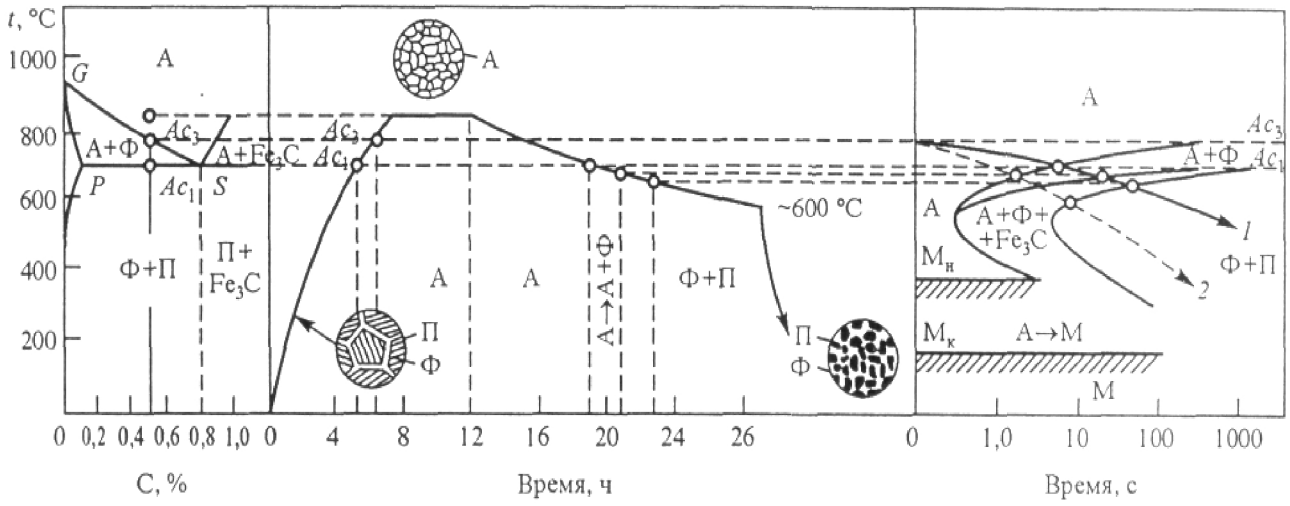


Рис. 3.2. Схема полного отжига доэвтектоидной (0,5 % С) стали:
1 – отжиг; *2* – нормализация

Низкий отжиг (высокий отпуск) при нагреве ниже критической температуры A_1 (до 650–680°) применяется в основном для снижения твердости легированных сталей.

Гомогенизирующий (диффузионный) отжиг применяется в ряде случаев к слиткам перед ковкой для выравнивания химического состава металла по сечению. Температура гомогенизации на 200–300° выше верхней критической точки. Практически гомогенизация совмещается с нагревом под ковку – при температуре гомогенизации дается длительная выдержка, а затем слиток нагревается до ковочной температуры.

Сфероидизирующий отжиг (отжиг на зернистый перлит) осуществляется для улучшения обрабатываемости эвтектоидных и заэвтектоидных сталей путем нагрева до температуры, превышающей на 20—30° температуру точки A_1 выдержки при этой температуре, медленного охлаждения до 700—650° и последующего охлаждения на воздухе. В некоторых случаях сфероидизация может быть достигну-

та только в результате неоднократного нагрева несколько выше точки A_1 и медленного охлаждения до температуры несколько ниже этой точки – маятниковый отжиг.

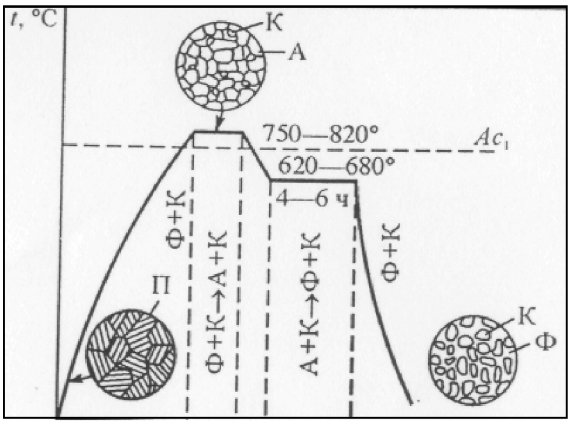


Рис. 3.3. Схема процесса сфероидизации

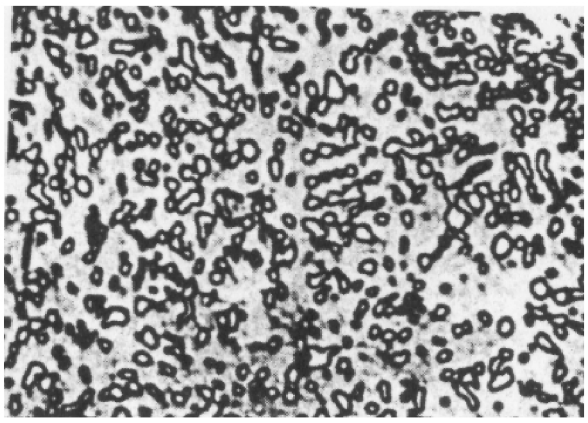


Рис. 3.4. Микроструктура эвтектоидной стали после сфероидизирующего отжига. Зернистый перлит Х500

Структура малоуглеродистых и малолегированных сталей после нормализации сравнительно мало отличается от структуры после полного отжига (прил.4). Нормализация высокоуглеродистой и легированной сталей дает более мелкозернистую структуру. При нормализации высоколегированной стали может иметь место закалка. Поэтому поковки некоторых марок средне- и высоколегированной стали (50Г, 45Х, 35СГ, 4ОСХ, 20Х2Н4А, 18ХНВА) после нормализации должны получать высокотемпературный отпуск для улучшения обрабатываемости резанием. Нормализация применяется также для подготовки структуры к последующей закалке.

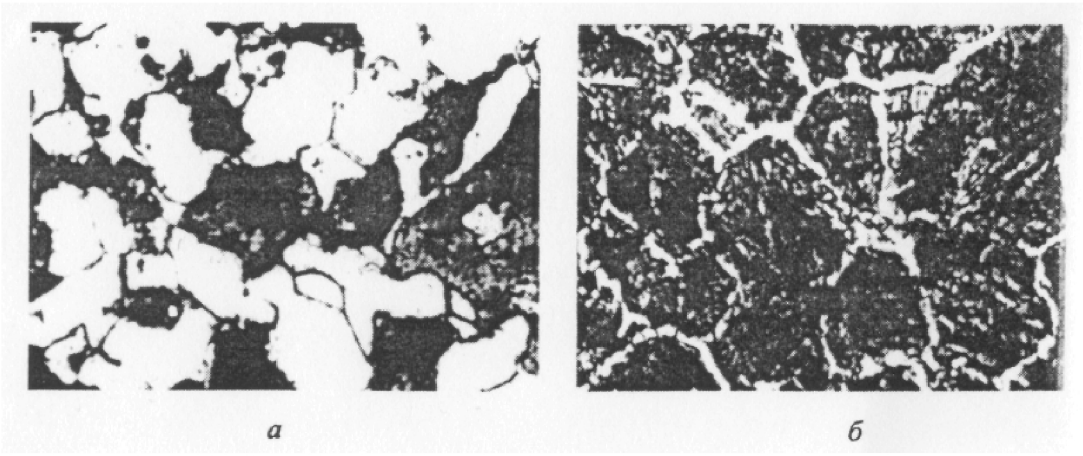


Рис. 3.5. Микроструктура стали (0,4 % С) после отжига (а) и после нормализации (б), Х500

Улучшение – операция термической обработки среднеуглеродистых сталей (% С = 0,35–0,6), которая состоит из полной закалки на мартенсит, проводимой после предварительной механической обработки поковок, и высокого отпуска на сорбит.

Закалка создает гораздо большие остаточные напряжения, чем нормализация или одинарная термическая обработка. Но высокий отпуск, проводимый непосредственно после закалки, почти полностью снимает закалочные напряжения. В сорбите, полученном при распаде аустенита в процессе нормализации или одинарной термической обработки, цементит имеет пластинчатую форму, а в сорбите после высокого отпуска – зернистую, что обеспечивает более высокую вязкость стали и относительное сужение. Сталь после операции улучшения должна прокаливаться насквозь по всему сечению крупных поковок во избежание образования трещин, понижения ударной вязкости, твердости и особенно усталостной прочности.

Конкретные характеристики каждого процесса представлены в табл. 3.1–3.3.

Противофлокенная обработка поковок представлена [16, 17]. Распространенным недостатком в крупных поковках легированных сталей являются флокены. Внутренние трещины (флокены) образуются в сталях, насыщенных водородом, который развивает в отдельных микрообъемах давления, превышающие прочность металла. С увеличением степени легированности возрастает склонность поковок к возникновению флокенов. Медленное охлаждение с температуры 800-900°С способствует удалению водорода из флокеночувствительных сталей. Чем ниже теплопроводность стали, тем меньше допускаемая скорость охлаждения поковок. Наличие водорода в исходном металле приводит к растрескиванию поковок при термической обработке или поломке деталей в процессе эксплуатации. Противофлокенная обработка снижает флокеночувствительность сталей и проводится сразу после ковки по нескольким режимам, но суть ее – в создании условий для вывода водорода из сталей, растворимость которого уменьшается с понижением температуры.

Используя особенности кинетики распада переохлажденного аустенита, различают два вида противофлокенной обработки:

– для сталей, имеющих малоустойчивую перлитную ступень;

– для сталей с устойчивой перлитной ступенью распада или с практическим ее отсутствием, когда распад идет по бейнитной ступени (табл. 3.4).

Таблица 3.1

Характеристика процессов отжига сталей

Вид отжига	Стали, для которых применяется отжиг	Цель отжига	Температура нагрева	Скорость охлаждения	Структура после отжига	Назначение отжига
1	2	3	4	5	6	7
Полный или нормальный	Доэвтектоидные, эвтектоидные, легированные	Полная фазовая перекристаллизация	A_{C3} + 20 – 50°С A_{C1} + 20 – 50°С	Для углеродистых сталей – охлаждение со скоростью 50–100° С/ч до t=500–600°С, а ниже – на воздухе (если не опасны внутренние напряжения). Для легированных сталей – охлаждение со скоростью 20–30°С/ч	Мелкозернистая равновесная структура феррита и перлита (или только перлита), соответствующая диаграмме "железо-углерод"	Снятие внутренних напряжений, повышение механических характеристик пластичности и вязкости, снижение твердости, улучшение обрабатываемости резанием, получение мелкозернистой структуры. В случае недостаточного смягчения легированные стали подвергают затем высокому отпуску при t = 680°С, в процессе которого образуется сорбит (при охлаждении на воздухе)
Неполный отжиг (ускоренный или более экономичный)	Доэвтектоидные стали (применяются ограниченно)	Перекристаллизация частичная только перлита	Выше Ac_1, но ниже Ac_3,			Снятие внутренних напряжений, уменьшение твердости, улучшение обрабатываемости резанием

Продолжение табл. 3.1

1	2	3	4	5	6	7
Сфероидизация (отжиг на зернистый перлит), разновидность неполного отжига инструментальных сталей	Эвтектоидные, заэвтектоидные и легированные инструментальные стали	Основной способ получения сфероидального (зернистого) перлита в инструментальных сталях	A_{c1}+ 10 – 20°С	Очень медленное охлаждение со скоростью 20–30° С/ч до t = 500 – 600°С, а затем на воздухе	Для эвтектоидных сталей – зернистый перлит, для заэвтектоидных – зернистый перлит и избыточный цементит	Наличие зернистого перлита обеспечивает наименьшую твердость, наилучшую обрабатываемость резанием, волочением, калибровкой, подготовку структуры к последующей термообработке
Маятниковый отжиг (циклический)	Инструментальные стали	Ускорение процесса сфероидизации путем периодического повышения температуры относительно только A_1 = 680-740°С	A_{C1}± 30°с			
Низкотемпературный отжиг (высокий отпуск)	Конструкционные высоколегированные и все виды инструментальных сталей	Только снижение внутренних напряжений (без фазовой перекристаллизации)	A_{C1}- 50°С	Охлаждение в печи до 250–350°С, а затем – можно на воздухе	Как при полном отжиге	Уменьшение твердости, снятие внутренних напряжений, улучшение обрабатываемости резанием

Окончание табл.

1	2	3	4	5	6	7
Изотермический отжиг – (преимущественно для поковок небольших размеров)	Легированные и высокоуглеродистые стали (в основном)	Сокращение общей продолжительности отжига легированных сталей за счет полного распада аустенита при изотермической выдержке в перлитном интервале	Первоначально нагрев до A_{c1} или A_{cm} +20–30°С, а затем изотермическая выдержка при A_{c1} – 50–100°С	Ускорение охлаждения до температуры изотермической выдержки, а после нее – охлаждение на воздухе или с задержкой скорости в печи для крупных поковок из флокеночувствителъной стали	Более однородная, чем при полном отжиге, мелкозернистая структура. В высокоуглеродистых сталях структура состоит из перлита и мелких, равномерно распределенных, одинаковой величины карбидов	Основное назначение – смягчение стали перед обработкой резанием за счет снижения твердости до минимума, снятие внутренних напряжений и повышение механических характеристик пластичности
Диффузионный отжиг (гомогенизация)	Для слитков из легированных сталей соответственного назначения (лучше не полностью остывших – меньше длительность отжига)	Выравнивание химической неоднородности путем диффузии в течение 80–100 часов обшей продолжительности отжига	A_{C1}, + 150 –250°С, выдержка 8–16 часов	С печью	Крупнозернистость устраняется последующей обработкой слитка давлением	Устранение грубой структуры, внутри кристаллической ликвации. Для снижения твердости слитков их иногда подвергают последующему отпуску при 670–680°С в течение 12–16 часов

Таблица 3.2

Характеристика процесса нормализации сталей

Вид отжига	Стали, для которых применяется отжиг	Цель отжига	Температура нагрева	Скорость охлаждения	Структура после термообработки	Назначение термообработки
Нормализация	Конструкционные стали после горячей обработки давлением	Полная перекристаллизация структуры	A_{c3} +30–50°С	На спокойном воздухе	Малоуглеродистая сталь (до 0,3% С): перлит с прослойками феррита	Выравнивает структурную неоднородность поковок, измельчает структуру, уничтожает ее строчечность, улучшает обрабатываемость резанием, подготавливает структуру к последующей термообработке
					Среднеуглеродистая сталь (0,3-0,5% С): сорбит с небольшим количеством феррита и более мелким зерном	
	Высокоуглеродистые стали		A_{cm} + 30–50°С		Более мелкозернистая структура после перекристаллизации	
Нормализация с высоким отпуском	Высоколегированные конструкционные стали с повышенной устойчивостью переохлажденного аустенита		A_{c3} + 100 –150 °С Затем высокий отпуск при t =660–680° С в зависимости от марки стали		Структура мельче, чем при отжиге	Снижение высокой твёрдости до заданной, улучшение обрабатываемости резанием

Таблица 3.3

Характеристика процесса улучшения сталей

Вид отжига	Стали, для которых применяется отжиг	Цель отжига	Температура нагрева	Скорость охлаждения	Структура после термообработки	Назначение термообработки
Улучшение, полная закалка	Среднеуглеродистые стали	Получение сорбита отпуска по всему сечению поковки	A_{c3}+30-50°С	В воде	Мартенсит отпуска	Улучшением заменяют процессы нормализации для ответственных деталей, что обеспечивает повышенную прочность и ударную вязкость
Высокий отпуск			450-650°С	На воздухе или в воде	Сорбит отпуска	

Таблица 3.4

Характеристика процессов противофлокенной обработки

Вид отжига	Группы флокеночувствительных сталей	Этапы противофлокенной обработки	Температура нагрева	Скорость охлаждения	Назначение противофлокенной обработки
Противофлокенная обработка	Крупные поковки для углеродистых сталей 15, 20, 25, 30, 40, 45, 50, низколегированных сталей 20Х, 35Х, 40Х, 10Г2, 50Г, 25ГС, 20ХГСА, 60ХГ, 35ХМ	Выдержка	550-650°С	В печи с открытой крышкой	Снижение напряжений Предохранение от образования флокенов
		Перекристаллизационный отжиг	A_{c3} +30–50°С		
		Распад переохлажденного аустенита	640–660°С	В печи со скоростью 40°С/ч до t=400°С, а ниже – со скоростью 20°С/ч до t =150- 100°С	
		Для сталей 2 группы после выдержки при A_{c1} +30–50°С дается иногда выдержка при 300–350 °С	300-350°С		
Противофлокенная обработка	Крупные поковки среднелегированных сталей 20ХН, 40ХН, 50ХН, 38ХГН, 5ХНМ Высоколегированные стали 34ХН3М, 30ХН3М, 5ХНМ2	Выдержка	300-350°С	Как для сталей 1 и 2 групп	Как для сталей 1 и 2 групп
		Перекристаллизационный отжиг	A_{c3}+20–40°С		
		Распад переохлажденного аустенита	200–250°С		
		Высокий отпуск	640–660°С		
		Для высоколегированных сталей 4 группы проводят две выдержки для распада переохлажденного аустенита и два высоких отпуска	200–250°С 640-660°С		

3.2 Типовые схемы предварительной термообработки сталей

Предварительной термообработкой решаются технологические задачи подготовки или получения такой структуры, которая обеспечивает лучшую обрабатываемость резанием или пластическим деформированием; уменьшение коробления и ускорение процессов диффузии при окончательной термообработке. Так, для обработки резанием наиболее благоприятны сфероидизированные структуры, а для сверления и расточки – структуры пластинчатого перлита (прил.4). Эта же структура является лучшей при резании на станках-автоматах, т.к. только в этом случае стружка ломается активно. Поэтому выбор вида предварительной термообработки зависит от конкретно поставленной задачи; от состава стали по углероду и легирующим элементам, которые определяют устойчивость аустенита при охлаждении с температуры ковки; от массы (размеров) поковок, которая влияет на способ нагрева (непрерывный, ступенчатый), продолжительность выдержки и характер охлаждения. Следовательно, температуру нагрева, тип охлаждающейся среды и скорость охлаждения устанавливают по марке стали. При этом важную роль играют эксплуатационные требования и порядок испытаний при приемке-сдаче продукции (табл.3.5).

Таблица 3.5

Группы поковок по эксплуатационным требованиям

Группа	Характер групп	Обязательные показатели механических свойств	Порядок испытания
Н	Неответственные поковки, изготавливаемые из стали одной марки	НВ	> 10% от партии одного чертежа, одной марки и одной плавки
О	Ответственные, изготавливаемые из стали одной плавки	$\sigma_т$, δ или $\sigma_т$, ψ	>5% от партии одного чертежа, одной марки и одной плавки
ОО	Особо ответственные поковки, подлежащие поштучным испытаниям	$\sigma_т$, δ, KCU или $\sigma_т$, ψ, KCU	Испытывается каждая поковка

На рис. 3.6–3.12 представлены типовые графики видов и примерный температурный режим ПТО для стальных поковок с различным содержанием углерода.

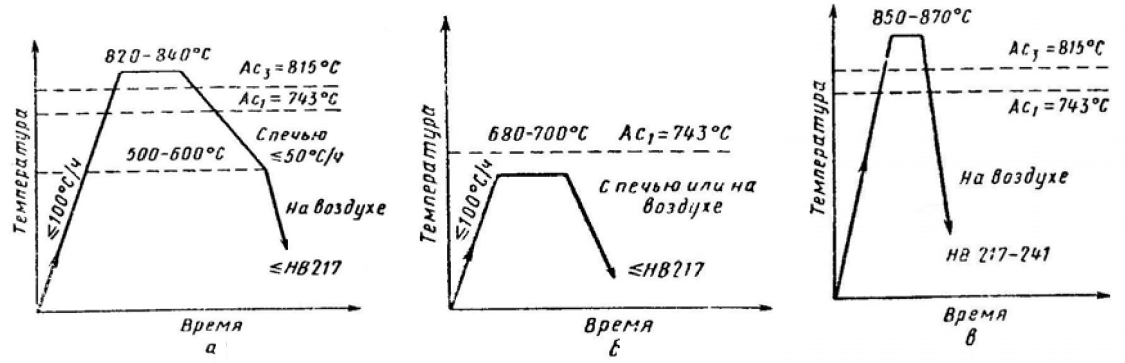


Рис. 3.6. Рекомендуемые схемы и режимы предварительной термической обработки стали 40Х: *а* – отжиг с непрерывным охлаждением; *б* – высокий отпуск; *в* – нормализация

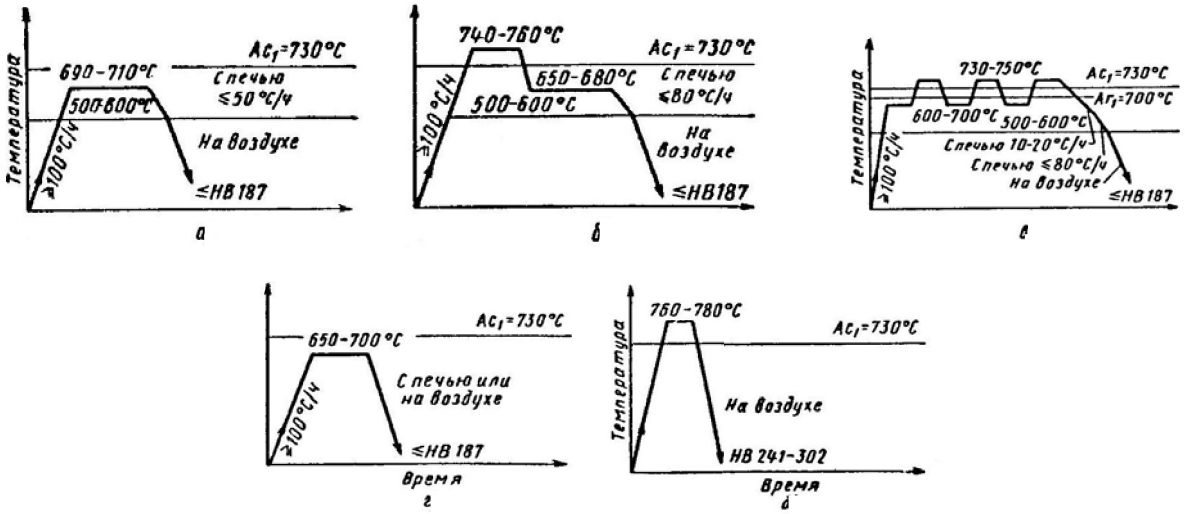


Рис. 3.7. Рекомендуемые схемы и режимы предварительной термообработки стали У8А: *а* – неполный отжиг; *б* – изотермический отжиг; *в* – сфероидизация (маятниковый отжиг); *г* – высокий отпуск; *д* – нормализация

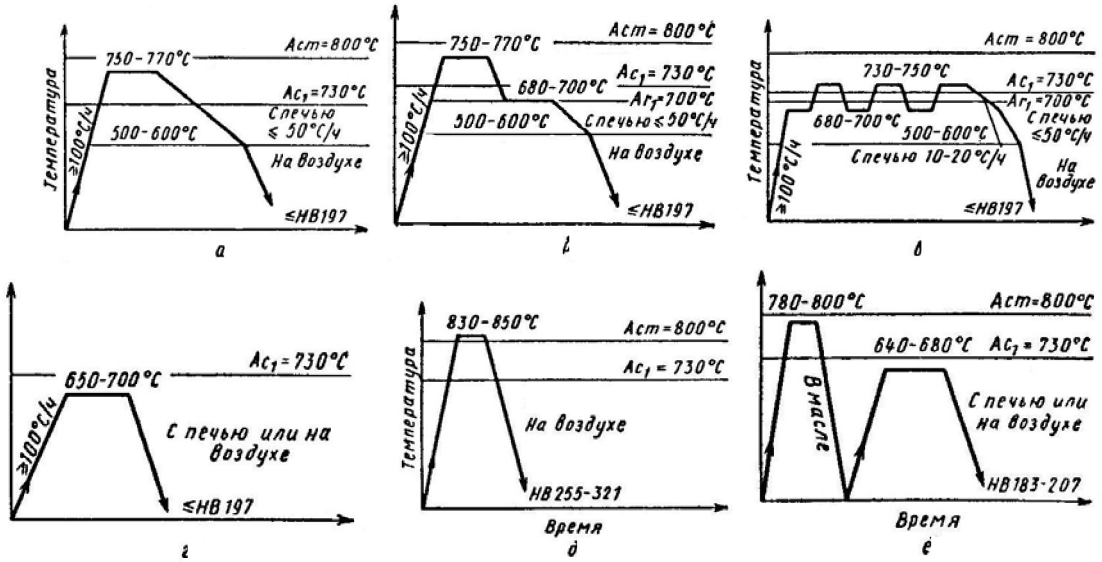


Рис. 3.8. Рекомендуемые схемы и режимы предварительной термообработки стали У10А: *а* – отжиг с непрерывным охлаждением; *б* – изотермический отжиг; *в* – сфероидизация (маятниковый отжиг); *г* – высокий отпуск; *д* – нормализация; *е* – улучшение

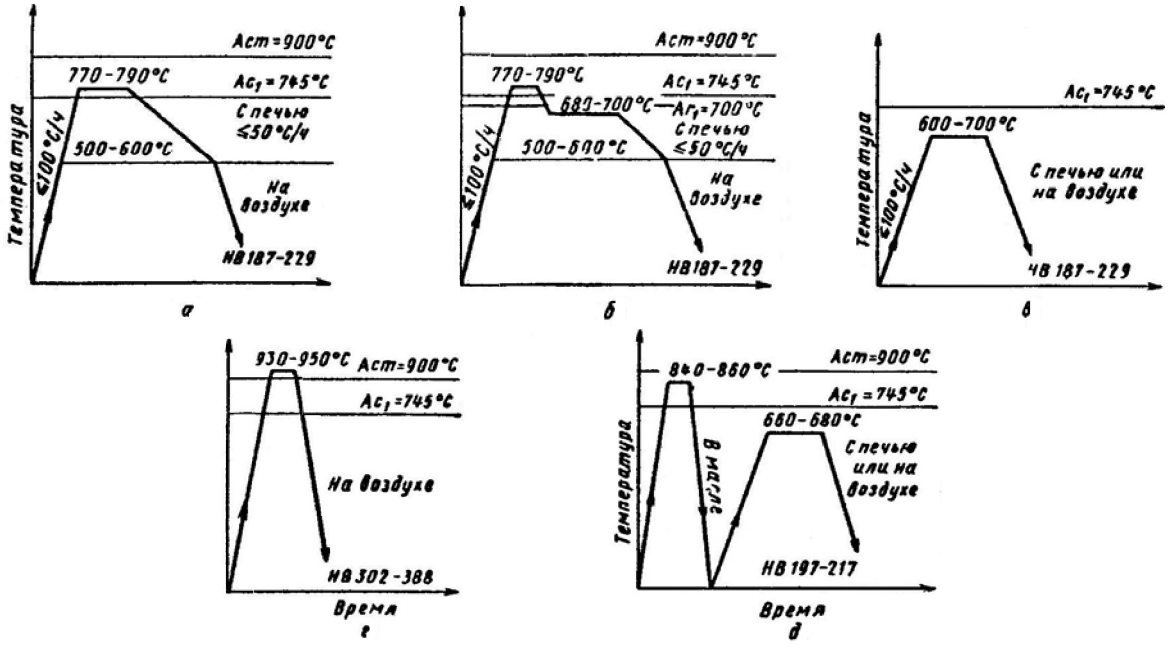


Рис.3.9. Рекомендуемые схемы и режимы предварительной термообработки стали Х, ШХ15: *а* – отжиг; *б* – изотермический отжиг; *в* – высокий отпуск; *г* – нормализация; *д* – улучшение

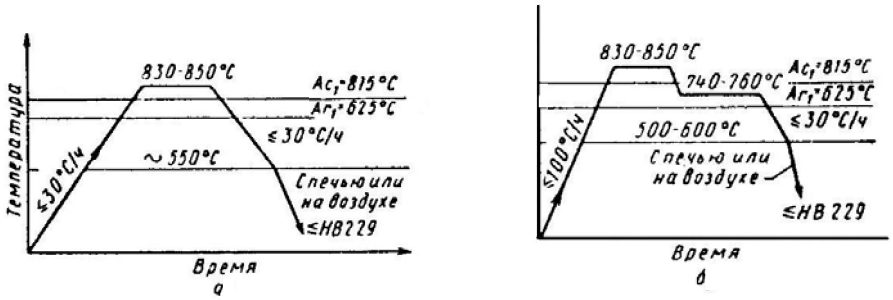


Рис. 3.10. Рекомендуемые схемы и режимы предварительной термообработки стали Х6ВФ: *а* – отжиг с непрерывным охлаждением; *б* – изотермический отжиг

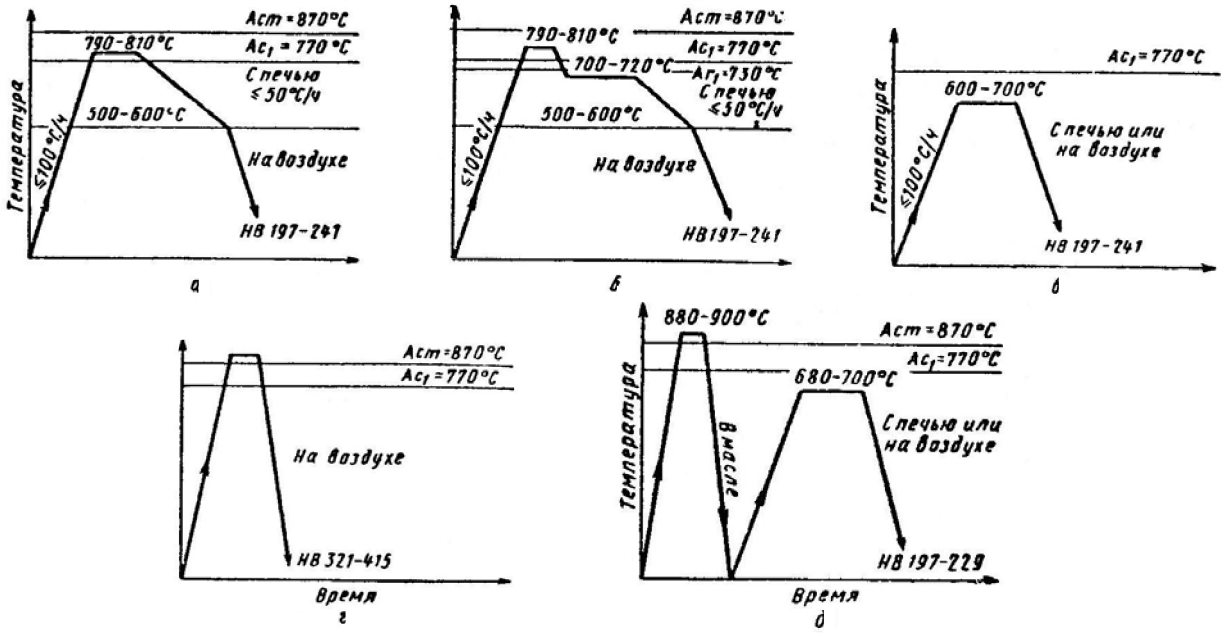


Рис. 3.11. Рекомендуемые схемы и режимы предварительной термообработки стали 9ХС: *а* – отжиг с непрерывным охлаждением; *б* – изотермический отжиг; *в* – высокий отпуск; *г* – нормализация при 900–920°С; *д* – улучшение

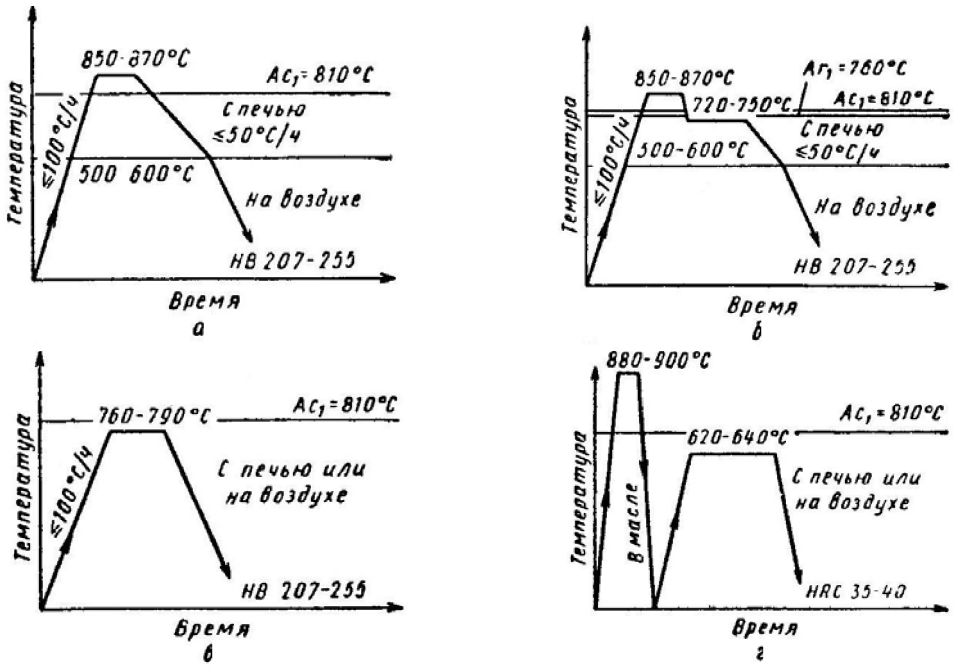


Рис. 3.12. Рекомендуемые схемы и режимы предварительной термообработки стали Х12Ф1: *а* – отжиг с непрерывным охлаждением; *б* – изотермический отжиг; *в* – высокий отпуск; *г* – улучшение

Отжиг с непрерывным охлаждением рекомендуется проводить в шахтных и камерных печах. Продолжительность выдержки после прогрева всей садки до температуры отжига составляет 2 –3 часа.

3.3. Типовые режимы предварительной термической обработки наиболее употребляемых марок сталей

Процессы ПТО конструкционных сталей (прил.3) являются наиболее распространенными в машиностроении, поэтому в технической и справочной литературе [1-3, 6, 9, 14, 15, 20] существует обширный фактический материал. Основные режимы обработки этих сталей приведены в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Типовые режимы предварительной термообработки углеродистых и легированных конструкционных сталей

Марка стали	Операция предварительной термообработки поковок	Температура нагрева, °С	Способ охлаждения	Твердость НВ
10, 15	Нормализация	900-940	На воздухе	<143
20	1 – Нормализация 2 – Нормализация Отпуск высокий	890-920 890-920 680-700	На воздухе	<156 121–156
30	1 – Нормализация 2 – Нормализация Отпуск высокий	850-900 850-900 680-700	– // – – // – – // –	170–207 187–217

Продолжение табл. 3.6

Марка стали	Операция предварительной термообработки поковок	Температура нагрева, °С	Способ охлаждения	Твердость НВ
35	Нормализация	850–870	На воздухе	<187
40	1 – Нормализация 2 – Нормализация Отпуск высокий	830–860 830–860 680–700	– // – – // – – // –	179–229 170–207
45	1 – Нормализация 2 – Нормализация Отпуск высокий 3 –Закалка Отпуск высокий	820–850 820–850 640–680 820–840 580–640	– // – – // – – // – В воде На воздухе	179–241 207–241 192–228
50	1 – Нормализация 2 – Нормализация Отпуск высокий 3 –Закалка Отпуск высокий	810–840 840 620–660 850 590–600	На воздухе – // — – // – В воде На воздухе	179–255 207–241 <228–350
60	1 – Отжиг 2 – Нормализация	810	С печью На воздухе	187–207
85	1 – Отжиг 2 – Нормализация Отпуск высокий	800–820 740–760 650–680	С печью На воздухе	<228
15Г	Нормализация Высокий отпуск	900–930	На воздухе	163–207
35Г2	1 – Отжиг 2 – Нормализация 3 – Закалка Отпуск высокий	775 840–860 800–820 620–645	С печью На воздухе В воде На воздухе	179 241 225–302
45Г2	1 – Отжиг 2 – Нормализация 3 – Закалка Отпуск высокий	775–800 830–850 830–850 550–600	С печью На воздухе В масле В воде	187 <241 269–321
50Г	1 – Отжиг 2 – Нормализация 3 – Нормализация Отпуск высокий 4 – Закалка Отпуск высокий	775–800 840–870 820–840 820–860 660–700 840 560–570	С печью На воздухе – // – – // – В воде На воздухе	187 179–229 <241 – 207-228
50Г2	1 – Отпуск 2 – Нормализация 3 – Нормализация Отпуск высокий	810–830 820–850 820–850 680–700	С печью На воздухе – // – – // –	187–229 207–255 –
60Г	1 – Отжиг 2 – Нормализация 3 – Закалка Отпуск высокий	775–800 840 830–850 610–670	С печью На воздухе В масле В воде	<228 – – -

Продолжение табл. 3.6

Марка стали	Операция предварительной термообработки поковок	Температура нагрева, °С	Способ охлаждения	Твердость НВ
65Г	1 – Отжиг	775–800	С печью	<229
	2 – Нормализация	840	На воздухе	–
	3 – Закалка	830–850	В масле	–
	Отпуск высокий	610–670	В воде	–
15Х	1 – Отжиг	860–870	С печью	131–156
	2 – Нормализация	870–900	На воздухе	131–163
	3 – Нормализация	870–900	– // –	187–229
	Отпуск высокий	680–700	– // –	–
	4 – Закалка	860	В воде	–
	Отпуск высокий	500	На воздухе	–
20Х, 20Х3	1 – Отжиг	860–870	С печью	143–187
	2 – Нормализация	870–900	На воздухе	156–179
	3 – Нормализация	870–900	– // –	
	Отпуск высокий	680–700	– // –	
	4 – Закалка	860	В воде	
	Отпуск высокий	500	На воздухе	
38ХА	1 – Отжиг	850–870	На воздухе	<207
	2 – Нормализация	885–940	– // –	
	3 – Нормализация	850	На воздухе	
	Отпуск высокий	660	– // –	
40Х	1 – Отжиг	830-850	С печью	170–207
	2 – Нормализация	850-870	На воздухе	178–241
	3 – Нормализация	850-860	– // –	
	Отпуск высокий	620-680	– // –	197–241
45Х	Нормализация	840-860	На воздухе	<228
25СГ 35СГ	1 – Отжиг	930	На воздухе	187–228
	2 – Нормализация	930	– // –	163
	3 – Нормализация	600	В воде	
	Отпуск высокий	580-620	На воздухе	229
40СХ	1 – Отжиг	880	С печью	241–269
	2 – Нормализация	900	На воздухе	-
	Отпуск высокий	660	– // –	
20ХН	1 – Отжиг	860–880	С печью	170–207
	2 – Нормализация	870–900	На воздухе	187–229
40ХН	1 – Отжиг	800–850	С печью	187–241
	2 – Нормализация	840–860	На воздухе	207–255
	3 – Нормализация	800–820		
	Отпуск высокий	650–660		179–241
50ХН	1 – Нормализация	800–820	На воздухе	217–269
	2 – Нормализация	900–920	– // –	179–207
	Отпуск высокий	700–710	– // –	
12ХН2, 12ХН3	Нормализация	885–940	На воздухе	<207 156–228
12ХН3А	Нормализация	860–890	На воздухе	156–229

Окончание табл. 3.6

Марка стали	Операция предварительной термообработки поковок	Температура нагрева, °С	Способ охлаждения	Твердость НВ
12Х2Н4, 12Х2Н4А	1 – Нормализация 2 – Нормализация Отпуск высокий	885–940 920–950 640–660	На воздухе – // – – // –	187–255 <268
12Х2Н4	1 – Нормализация 2 – Нормализация Отпуск высокий	860–890 860–920 640–660	На воздухе – // –	187–241 207–269
20Х2Н4А	Нормализация Отпуск высокий	860–950 640–660	На воздухе – // –	229–269
15ХФ	Нормализация	860–880	На воздухе	156–187
18ХГ	1 – Отжиг 2 – Нормализация	840–860 850–860	С печью На воздухе	170–207 207–241
18ХНВА, 18ХНМА	Нормализация Отпуск высокий	940–960 610–650	На воздухе – // –	197–269
30ХМ	1 – Отпуск 2 – Нормализация	830–850 840–860	На воздухе	187–229 207–255
30ХМА	Отжиг	900	В печи	170–207
35ХМ	1 – Нормализация 2 – Нормализация Отпуск высокий	880 950 600–640	На воздухе В воде На воздухе	207–255 207–241
30ХГСА	1 – Отжиг 2 – Закалка Отпуск высокий	840–870 860–880 640–670	В печи В масле На воздухе	207–241 217–241
30ХГС	Отжиг	840–870	В печи	207–241
40ХФА	1 – Отжиг 2 – Нормализация 3 – Закалка Отпуск высокий	830–850 800–820 870–890 870–890 630–660	С печью На воздухе В масле В воде	187–229 187–241 197–241 229–255
18ХГТ	Нормализация Отпуск высокий	900–930 670–700	На воздухе – // –	187–229
18Х2Н4МА	Нормализация Отпуск высокий	850–940 640–660	На воздухе – // –	197–269 255
38ХМЮА	Закалка Отпуск высокий	930–950 650–675	В масле В воде	 189–229
45ХНМФА	Отжиг	850–860	С печью	–
18ХГМ	Нормализация	850–860	На воздухе	187–228
20ХФА	Нормализация	900	С печью	146–207

В ряде случаев стали, нагартованные в процессе обработки давлением, подвергают рекристаллизационному отжигу. Типовые режимы отжига приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Рекристаллизационный отжиг конструкционных сталей

Марка стали	Температура нагрева,°С	Выдержка при нагреве	Охлаждающая среда
Сталь 10-85,15Г-70Г	680	до 1 часа	На воздухе
40Х, 38ХА, 20Х3, 40ХФА, 38ХМЮА, 30ХГСА	700	– // –	– // –
12ХН3А, 12Х3Н4А, 20ХН3А, 30ХН3А, 37ХН3А,40ХНМА	660	– // –	– // –
18НВА, 25ХНВА, 20ХН4ВА	640	– // –	– // –

Подготовка структуры стальных изделий путем ПТО для последующей обработки резанием является одной из важных операций технологического процесса изготовления деталей. Для различных операций резания (точение, сверление, протягивание и др.) необходимо создавать свою оптимальную структуру. В табл. 3.8 даны ряд режимов предварительной термообработки и характер получаемой при этом структуры.

Типовые режимы предварительной термической обработки наиболее распространенных инструментальных сталей приведены в табл. 3.9-3.10.

Таблица 3.8

Рекомендуемые режимы ПТО для оптимальной обрабатываемости резанием некоторых конструкционных сталей в условиях крупносерийного и массового производства

Заготовки	Марка стали	Рекомендуемая обработка	Особенности структуры	Примечания
Поковки, штампованные заготовки, горячекатаный сортовой прокат	15 20 15Х	Ускоренное охлаждение до температуры 950-970°С	Дифференцированная структура с достаточно крупными выделениями феррита	В сечении до 30–50 мм – нормализация
Поковки, штампованные заготовки, горячекатаный сортовой прокат	18ХГТ 30ХГТ 25ХГМ 25ХГТ 25ХГНМТ 25ХГНМАЮ	Изотермический отжиг	Частично сфероидизированный перлит	– // – – // – В сечении >100 мм – по режиму легированной стали
Поковки, штампованные заготовки	12ХН3А 20Х2Н4А	Нормализация и отпуск при 640–680°С	Пластинчатый перлит (сфероидизация перлита >20%)	–

Окончание табл. 3.8

Заготовки	Марка стали	Рекомендуемая обработка	Особенности структуры	Примечания
Штампованные заготовки, горячекатаный сортовой прокат	60С2	Нормализация и отпуск при 650–680°С	Частично сфероидизированный перлит	Отпуск до 700–720°С при больших объемах фрезерных работ
Поковки, горячекатаный сортовой прокат	У8–У12 ШХ15	Маятниковый отжиг в районе *А*	Зернистый перлит	Для стали ШХ15 в сечении до100 мм – не более двух циклов
Поковки, штампованные заготовки	40 45 40Х 40ХН 40Р	Нормализация при 880-900°С	Пластинчатый перлит	Допустимо улучшение, если оно является окончательной термической обработкой

Таблица 3.9

Типовые режимы предварительной термообработки инструментальных сталей

Марка стали	Операция предварительной термической обработки поковок	Температура нагрева, °С	Способ охлаждения	Твердость НВ
Углеродистые стали инструментальные				
У7-У8, У8Г	1 – Отжиг 2 – Изотермический отжиг 3 – Рекристаллизационный отжиг	750–770 600–650 680	С печью Выдержка 1–2 ч На воздухе	< 207 107–187 –
У9-У13	1 – Отжиг 2 – Изотермический отжиг 3 – Рекристаллизационный отжиг	750–770 620–680 680 до 1 ч	С печью Выдержка 1–2 На воздухе	163–217 179–207 –
Легированные стали инструментальные				
I. Доэвтектоидные				
5ХНМ, 5ХГМ	1 – Отжиг 2 – Закалка и высокий отпуск	760–790 650–690	С печью На воздухе	207–255 187–228
4ХВ2С 5ХВ2С	1 – Отжиг 2 – Закалка и высокий отпуск 3 – Рекристаллизационный отжиг	800-820 690–730 700 до 1 ч	С печью На воздухе – // –	207–241 190–235
4ХС	1 – Отжиг 2 – Закалка и высокий отпуск 3 – Рекристаллизационный отжиг	840–870 700–740 700 до 1 ч	С печью На воздухе – // –	207–241 196–235
3Х2В8	1 – Отжиг 2 – Закалка и высокий отпуск	840–870 700–740	С печью На воздухе	207–241 196–235

Окончание табл. 9

Марка стали	Операция предварительной термической обработки поковок	Температура нагрева, °С	Способ охлаждения	Твердость НВ
II. Эвтектоидные и заэвтектоидные				
Х, ШХ12, ШХ15	1 – Отжиг	770–790	В печи	187–229
	2 – Изотермический отжиг	670–700 3–4 ч		197–228
	3 – Рекристаллизационный отжиг	700 до 1 ч	На воздухе	
Х, Х09, ШХ9	1 – Отжиг	770–790	В печи	
	2 – Изотермический отжиг	670–700 3–4 ч		
	3 – Рекристаллизационный отжиг	700 до 1 ч	На воздухе	187–228
ХО5, ШХ6	1 – Отжиг	770–790	В печи	
	2 – Изотермический отжиг	670–700 3–4 ч		217–255
	3 – Рекристаллизационный отжиг	700 до 1 ч	На воздухе	
9ХС	1 – Отжиг	790–810	В печи	197–241
	2 – Изотермический отжиг	700–730 3–4 ч		
	3 – Рекристаллизационный отжиг	700 до 1 ч	На воздухе	217–255
ХГ	1 – Отжиг	790–810	В печи	197–241
	2 – Изотермический отжиг	700–730 3–4 ч		
	3 – Рекристаллизационный отжиг	700 до 1 ч	На воздухе	217–255
ХВГ	1 – Отжиг	770–790	В печи	179–217
	2 – Изотермический отжиг	700–730 3–4 ч		
	3 – Рекристаллизационный отжиг	700 до 1 ч	На воздухе	217–255
9ХВГ	1 – Отжиг	770–790	В печи	197–241
	2 – Изотермический отжиг	690–720 3–4 ч		187–228
7Х3	1 – Отжиг	780–800	В печи	
	2 – Изотермический отжиг	700–730 3–4 ч		
	3 – Рекристаллизационный отжиг	700 до 1 ч	На воздухе	207–241
III. Ледебуритные				
Х12	1 – Отжиг	850–870	В печи	217–269
	2 – Изотермический отжиг	720–750 4–5 ч		
	3 – Рекристаллизационный отжиг	730–750	В воде	228–255
Х12М	1 – Отжиг	850–870	В печи	207–255
	2 – Изотермический отжиг	720–750 4–5 ч		
	3 – Рекристаллизационный отжиг	730–750	В воде	228–250
ХВ5	1 – Отжиг	800–820	В печи	
	2 – Изотермический отжиг	670–700 3–4 ч		207–255
	3 – Рекристаллизационный отжиг	700	На воздухе	
IV. Быстрорежущие				
Р18	1 – Отжиг	830–850	В печи	
	2 – Изотермический отжиг	720–750 5–6 ч		217–255
	3 – Рекристаллизационный отжиг	760–780	В воде	
Р9	1 – Отжиг	830–850	В печи	
	2 – Изотермический отжиг	720–750 4–5 ч		207–241
	3 – Рекристаллизационный отжиг	760–780 до1 ч	В воде	

3.4 Уровень механических свойств после различных видов предварительной термической обработки

Конечным результатом любой предварительной термообработки является получение необходимых механических свойств. Так, например, поковки из легированных сталей в зависимости от вида и режима ПТО имеют следующую классификацию (табл. 3.10).

Таблица 3.10

Классификация поковок из легированной стали по механическим свойствам

Класс поковки	Механические свойства						
	$\sigma_в$, кг/мм^2	$\sigma_т$, кг/мм^2	δ_5, %	Ψ, %	KCV, кгм/см^2	Твердость	
	не менее					НВ	Диаметр отпечатка, мм
КТ-35	60	35	12	40	5	179-207	4,5-4,2
КТ-40	65	40	12	40	5	187-212	4,45-4,15
КТ-45	70	45	12	40	5	196-229	4,30-4,0
КТ-50	75	50	10	40	5	207-235	4,2-3,95
КТ-55	80	55	10	40	5	217-248	4,10-3,85
КТ-60	85	60	10	40	4,5	229-262	4,00-3,75
КТ-65	90	65	8	35	4,5	241-277	3,90-3,65
КТ-70	95	70	8	35	4,5	248-286	3,85-3,60
КТ-75	100	75	8	35	4,0	262-302	3,75-3,50
КТ-80	105	80	8	35	4,0	269-311	3,70-3,45

В табл. 3.11 – 3.12 приведены данные для конкретных поковок и штамповок из конструкционных углеродистых и легированных сталей.

Оптимальные служебные свойства (высокую твердость, износостойкость, теплостойкость и др.) инструментальные стали (прил. 3) получают, как правило, в результате сочетания предварительной и окончательной термической обработки. Различные виды ПТО для этих сталей обеспечивают решение целого ряда задач. Например, отжиг в результате перекристаллизации измельчает зерно и дает структуру зернистого перлита, что улучшает эксплуатационные свойства после окончательной термообработки.

Таблица 3.11

Механические свойства поковок углеродистой стали после нормализации

Марка стали	Максимальный диаметр поковки, мм	Механические свойства						
		$\sigma_в$, кг/мм^2	$\sigma_т$, кг/мм^2	δ_5, %	Ψ, %	KCU, МДж/м^2	Твердость	
							HB	Диаметр отпечатка, мм
		не менее					не более	не менее
15	100 100–300 300–500	35 34 33	25 17 15	27 25 24	55 50 45	0,65 0,6 0,55	143	5,0
20	100 100–300 300–500 500–750	40 38 37 36	22 20 19 18	24 23 22 20	53 50 45 40	0,55 0,50 0,50 0,45	156	4,8
25	100 100–300	43 40	24 22	22 20	50 48	0,50 0,40	170	4,6
30	100 100–300 300–500 500–750	48 47 46 45	25 24 23 22	19 19 18 17	48 46 40 35	0,40 0,35 0,35 0,30	179	4,5
35	100 100–300 300–500 500–750	52 50 48 46	27 26 24 23	18 18 17 16	43 40 37 32	0,35 0,30 0,30 0,25	187	4,4
40	100 100–300 300–500 500–750	56 54 52 50	28 27 26 25	17 17 16 15	40 36 32 30	0,30 0,30 0,25 0,25	207	4,2
45	100 100–300 300–500 500–750	60 58 56 54	30 29 28 27	15 15 14 13	38 35 32 30	0,30 0,25 0,25 0,20	217	4,1
50	100 100–300 300–500	62 60 58	32 30 29	13 12 12	35 33 30	0,30 0,25 0,25	229	4,0
55	100 100–300 300-500	66 64 62	30 32 31	12 11 10	30 28 25	0,30 0,25 0,25	229	4,0
60	100	65	35	10	28	–	229	4,0

Таблица 3.12

Механические свойства поковок из углеродистой и легированной стали после улучшения

Марка стали	Закалка		Отпуск		Механические свойства, не более						
	Температура, °С	Охлаждающая среда	Температура, °С	охлаждающая среда	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ_5, %	Ψ, %	KCU, МДж/м^2	НВ	Размер сечения поковок, мм
40	830–850	вода	580–630	воз-дух	600	320	18	40	0,5	192–228	До 100
45	820–850	»	580–630	»	650	350	17	38	0,4	192–235	»100
50	820–840	»	560–620	»	700-800	370-420	15–17	40–45	0,4–0,5	212–235	»80
35Г2	800–820	»	610–640	вода	800	650	16	50	0,6	255–302	»60
45Г2	830–850	мас-ло	560–600	»	850	700	13	45	0,45	269–321	»60
50Г2	810–830	»	500–600	»	960	700	9	40	–	269–321	»60
50Г	820–840	»	550–600	воз-дух	800	550	8	40	0,35	241–285	»60
50СГ2	820–840	»	500–550	вода	800	450	12	35	0,4	241	»100
30Х	850–870	вода	550–570	»	720	500	14	45	0,5	212	»100
35Х	840–860	мас-ло	610–630	»	650	450	14	45	0,5	187	»100
35ХГ2	810–830	мас-ло	620-660	вода	85	70	12	45	8	235–269	»60
40ХГМ	850–870	»	560-600	В или М	110	100	12	50	7	321–387	»100
27СГ	920	вода	420	вода	100	80	10	45	9	-	»25
35СГ	900	»	590	»	85	65	15	40	6	-	»25
30ХСГ	860–880	»	640–660	»	75	55	12	45	6	241	»100
25ХГМ	850–880	мас-ло	560	»	63	37	34	69	7	170–179	»100
35ХГС	860–880	»	500	»	100	75	7	45	6	285	»60
40ХФА	870–890	»	630–660	»	90	75	10	50	9	269	»60

Окончание табл. 3.12

Марка стали	Закалка		Отпуск		Механические свойства, не более						
	Температура, °С	Охлаждающая среда	Температура, °С	охлаждающая среда	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ_5, %	Ψ, %	KCU, МДж/м^2	НВ	Размер сечения поковок, мм
445ХНМФА	860–880	»	550–600	воздух	105	90	9	40	5	321–363	»100
38ХМЮА	930-950	»	600-670	вода	100	85	15	50	9	266	»60
25ХНВА	850	»	560	воздух	110	95	11	45	9	-	»25
40Х	830-850	»	540-570	вода	78	55	12	40	4	288	»100
45Х	820-840	»	600-650	»	85	65	10	45	5	241	»100
35СГ	890-910	вода	580-620	»	85	65	15	40	6	202	»60
33ХС	920-940	»	620-640	»	95	75	15	45	6	286	»60
37ХС	880-900	масло	600-650	»	100	80	12	40	6	272-302	» 60
40ХС	910-930	»	600-650	»	90	70	12	45	6	246-269	»80
30ХН3	820-840	»	520-550	воздух	90	70	8	45	6	255	»60
37ХН3	810-830	»	550-580	масло	110	100	10	50	7	330-418	»60
40ХН	820-840	»	600-650	В или М	85	65	13	45	8	230-260	»100
40ХН	820-840	»	500-550	»	90	68	10	40	7	255	»100
30Х13	850-870	»	520-550	»	55	50	20	60	6	207	»100

3.5 Предварительная термическая обработка поковок из цветных сплавов

В авиа- и моторостроении наиболее широко используют поковки и штамповки из алюминиевых, магниевых, титановых сплавов. Магниевые сплавы, как и алюминиевые, имеют много общего в проведении предварительной термообработки, что объясняется отсутствием в них полиморфных превращений.

3.5.1 Основные виды предварительной термической обработки алюминиевых сплавов

Предварительная термообработка включает следующие процессы:

– гомогенизационный отжиг;

– полный смягчающий гетерогенизирующий отжиг;

– неполный (сокращенный) смягчающий отжиг.

Гомогенизационный отжиг

В технологических процессах кузнечно-штамповочного производства поковок из слитков гомогенизация является первой термической операцией. Температура гомогенизационного отжига промышленных алюминиевых сплавов колеблется в пределах 450–550°С, а выдержка при нагреве составляет от 4 до 40 часов в зависимости от марки материала. Как правило, температуру гомогенизации выбирают ниже температуры эвтектического превращения.

Гомогенизация слитков обеспечивает полное растворение неравновесных достаточно грубых эвтектических включений интерметаллидов Cu, Mg, Si, Zn с последующей оптимальной степенью распада твердого раствора, что приводит к устранению дендритной ликвации, повышению пластичности, при этом структура становится более гомогенной.

Относительное удлинение и сужение при температуре горячей деформации возрастают в результате гомогенизации в 1,5–3 раза.

Скорость охлаждения при гомогенизации обычно не регламентируют (слитки охлаждают вместе с печью или на воздухе).

Полный смягчающий гетерогенизирующий отжиг

Такой отжиг снимает внутренние напряжения в полуфабрикатах из алюминиевых сплавов, повышая их пластичность перед горячей деформацией. Его применяют ко всем упрочняемым алюминиевым сплавам. При отжиге характерными являются превращения, связанные с выделением избыточных фаз из твердого раствора в виде интерметаллидов (например, $CuAl_2$).Чем ниже концентрация матричного раствора и больше расстояние между выделениями, тем большее разупрочнение происходит при отжиге. При выборе режима отжига исходят из требований гетерогенизации структуры, предусматривая медленное охлаждение.

Для деформируемых алюминиевых сплавов температура полного отжига составляет 380–420°С с выдержкой при ней от 10 до 60 мин. Последующее охлаждение производят со скоростью не более 30 градусов в час.

Неполный (сокращенный) смягчающий отжиг

Данный отжиг проводят для термически упрочняемых алюминиевых сплавов при температурах ниже, чем полный отжиг. При этом во время выдержки концентрация матричного раствора становится настолько низкой, что можно использовать быстрое охлаждение на воздухе или в воде. Однако вследствие более низкой температуры время выдержки должно быть больше, чем при полном отжиге. При этом общая же продолжительность процесса уменьшается за счет более быстрого охлаждения. Поэтому сокращенный смягчающий отжиг большинства алюминиевых сплавов проводят при температуре 350-370°С с выдержкой 2-4 часа и охлаждением на воздухе или в воде. Следует отметить, что смягчающий гетерогенный отжиг применяют также к (α+β) латуням.

Конкретные режимы отжига алюминиевых деформируемых сплавов представлены в табл. 3.13.

Таблица 3.13

Режимы отжига деформируемых алюминиевых сплавов **[21-25]**

Марка сплава	Отжиг	
	Температура нагрева, °С	Охлаждающая среда
АД, АД1, АМц, АМг1, АМг2, АМг3	350–410	Воздух
АМг5 АМг6 Д18П	270–350 300–350 340–370	Воздух
Д1 Д16	1. 390–430, охлаждение до 260–270 со скоростью 30 град/ч 2. 350–370, 390–430, охлаждение до 250–270 со скоростью 30 град/ч	Воздух
АВ Д20 В92	350–370 350–370 350–400	Воздух
В95	390–430	Охлаждение со скоростью 30-50 град/ч до 150 °С, а далее –на воздухе 10-60 мин

3.5.2 Основные виды предварительной термической обработки магниевых сплавов

Для данных сплавов наиболее характерными являются:

– гомогенизационный отжиг;

– полный отжиг;

– неполный отжиг.

Гомогенизационный отжиг

Гомогенизационный отжиг повышает технологическую пластичность магниевых сплавов при горячей обработке давлением, выравнивает состав по объему зерна, снижает величину удельных усилий. Применяется отжиг в основном при производстве поковок из литых заготовок и слитков.

Гомогенизацию деформируемых магниевых сплавов часто совмещают с их нагревом под обработку давлением. При этом длительность выдержки при нагреве устанавливают меньше, чем при собственно гомогенизации, но больше, чем при обычном нагреве под ковку и штамповку.

Полный отжиг

Назначение этого вида отжига заключается в снижении остаточных напряжений, которые могут вызывать коробление изделий после обработки давлением. Медленное охлаждение в процессе отжига со скоростью не более нескольких градусов в час приводит к полному выделению избыточных фаз и предельному «смягчению сплавов».

Неполный отжиг

Данную термическую операцию проводят при температурах ниже линии ограниченной растворимости, но с длительной выдержкой. Техническое преимущество неполного отжига заключается в большей скорости охлаждения после выдержки.

Режимы отжига магниевых деформируемых сплавов представлены в табл. 3.14.

3.5.3 Основные виды предварительной термической обработки титановых сплавов

В основном они аналогичны алюминиевым и магниевым сплавам и включают:

– гомогенизационный отжиг;

– полный и неполный отжиг.

Конкретные режимы отжига поковок и штамповок из титана, α-титановых и (α+β)-титановых сплавов приведены в табл.3.15-3.16.

Таблица 3.14

***Режимы отжига деформируемых магниевых сплавов* [21, 22, 27]**

Марка сплава	Отжиг	
	Температура нагрева, °С	Время выдержки, ч
MAI, MA8, MA9	300-400	0,5-2
MA2	350-400	3-5
MA2-1	250-350	0,5-2
MA3	320-380	2-6
MA5	350-380	2-8
BM65-1	300-350	2-4
MA10	280-380	2-4
MA11	350	1
MA13	–	–
ВМД1, ВМ17	400	1
ИМЕТ-40	350-400	2

Таблица 3.15

Режимы отжига поковок и штамповок из титана и α-титановых сплавов

Сплав	Температура полного отжига, °С	Температура неполного отжига, °С
ВТ1-00	670–690	445–485
ВТ1-0	– // –	– // –
ВТ5	800–850	550–600
ВТ5-1	– // –	– // –
ОТ4-0	690–710	480–520
ОТ4-1	– // –	– // –
ОТ4	740–760	545–585
ВТ4	– // –	600–650
ОТ4-2	840–860	600–640
ВТ18	900–980	530–620
ВТ20	700–800	600–650

Таблица 3.16

Режимы отжигов поковок и штамповок из (α+β)-титановых сплавов

Сплав	Температура отжига, °С				
	неполный	полный	изотермический		
			t_1, °С	t_2, °С	часы
ВТ6С	600–650	750–800	800	750 или 500	0,5
ВТ6	– // –	–	–	–	–
ВТ8	530–620	–	920–950	590	1
ВТ9	530–620	–	950–980	530	6
ВТ14	550–650	740–760	790–810	640-660	0,5
ВТ16	–	–	770–7903	500*	–
ВТ22	550–650	–	650–750	350**	–
ВТ3-1	–	850	870–920	600-650	2
ВТ15	–	890–810	–	–	–

Примечание: – охлаждение от t_1 до t_2 проводится со скоростью 2–4° С/мин, а далее – на воздухе. **– охлаждение от t_1 до t_2 проводится с печью, а далее – на воздухе.*

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

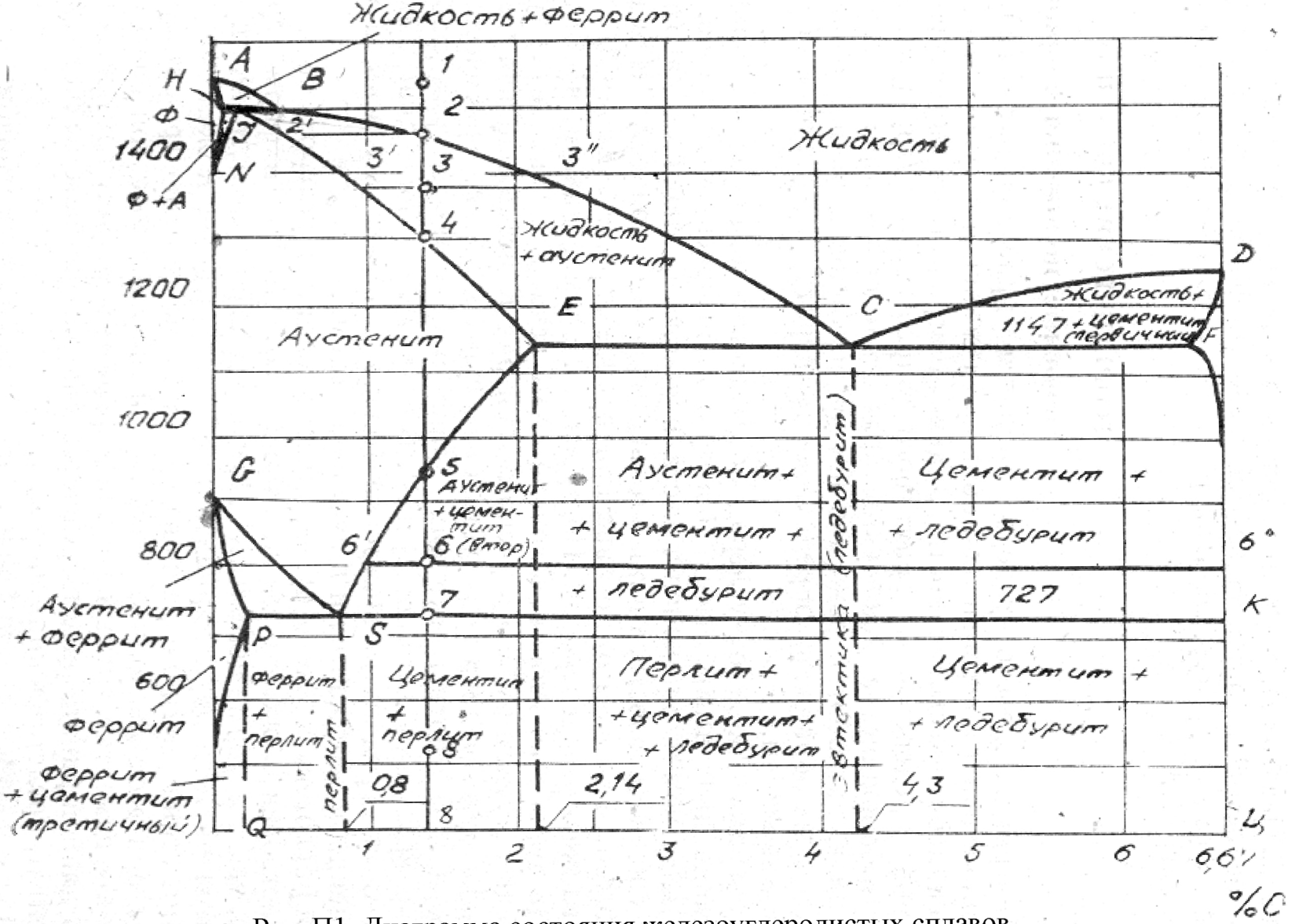


Рис. П1. Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Таблица П1

Критические точки углеродистой и легированной стали

Марка стали	Критические точки, °С			
	Ac_1	Ac_3	Ar_1	Ar_3
15	735	863	685	840
20	735	854	682	835
25	735	840	680	824
30	732	813	677	796
35	730	802	691	791
40	730	790	690	768
45	725	770	690	720
50	725	760	690	720
55	727	774	690	755
60	727	766	690	743
65	727	752	696	730
70	730	743	693	727
15Г	735	863	685	840
20Г	735	854	682	835
30Г	734	812	675	796
40Г	726	790	689	768
50Г	720	760	660	—
60Г	726	765	689	741
65Г	724	750	604	721
ЮГ2	720	830	620	710
30Г2	718	804	627	727
35Г2	713	794	630	710
40Г2	713	780	627	710
45Г2	713	766	627	704
50Г2	710	760	596	680
15Х	735	870	720	—
20Х	766	838	702	799
30Х	740	815	670	—
35Х	740	815	670	—
40Х	743	782	693	730
45Х	721	.771	660	693
50Х	720	770	660	693
25Н	730	820	660	—
30Н	730	820	660	—
15М	730	930	610	830
30М	740	815	666	760
40ХГ	743	782	730	793

Окончание табл. П1

Марка стали	Критические точки, °С			
	Ac_1	Ac_3	Ar_1	Ar_3
20ХФ	766	840	704	782
40ХФА	754	790	702	746
50ХФА	752	788	688	746
33ХС	760	860	—	—
40ХС	755	850	—	—
20ХМ	743	818	504	746
30ХМА	757	807	693	763
35ХМ"	745	820	620	—
35Х2М2	715	776	607	705
27СГ	750	880	—	—
35СГ	750	.830	645	—
20ХН	733	804	666	790
40ХН	731	769	660	702
50ХН	735	750	657	690
12ХН2	732	794	671	763
12ХН3	715	830	670	—
20ХН3	700	760	500	630
30ХН3	715	775	590	—
37ХН3А	710	770	640	—
12Х2Н4А	710	820	660	—
20ХГС	755	840	690	—
26ХГС	750	835	680	—
30ХГС	750	830	670	—
35ХГС	—	—	—	—
38ХМЮА	800	940	730	650
18ХНВА	700	810	350	600
25ХНВА	700	720	300	—
33ХН3МА	720	790	—	—
ШХ9	730—750	890	710—690	
ШХ15	727	768	694	713
50ХФА	752	788	688	746
1Х13	730	850	700	820
2Х13	820	—	780	—
3Х13	800	—	—	—
Х9С2	900	970	810	870
Х10С2М	850	950	700	845

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Таблица П2

Область применения различных марок стали (ориентировочно)

Марка стали	Область применения и примеры назначения
1	2
15	Штамповка и ковка в горячем состоянии. Цементуемые и цианируемые детали—болты, винты, гайки, вилки, рычаги
20	Кованые и штампованные тяги, серьги, крюки, траверсы, рычаги, втулки, вкладыши, колеса паровозов, крышки цилиндров
25	В машиностроении кованые и штампованные детали повышенной вязкости — оси, валы, цилиндры, тяги, траверсы, серьги, станины станов и станков, маховики
30	Ковка и штамповка в горячем состоянии. Валы, оси, соединительные муфты, болты, гайки, винты и шайбы (без высоких напряжений)
35	Кованые валы, оси, цилиндры прессов, шпиндели, тяги, валы турбин, валы редукторов, роторы, крепежные детали, обоймы турбин, цилиндры, диафрагмы, балансиры, маховики, станины станов и станков
40	Кованые коленчатые валы, шестерни, оси штока, приводные валы блюмингов и слябингов. В термообработанном состоянии шатуны, шестерни, оси, валы, бандажи. В нормализованном состоянии — шайбы, диски и фланцы
45	Кованые прокатные валки, шестеренные валки для прокатных станов, плунжеры насосов, шпиндели, зубчатые колеса и рейки, фрикционные диски, муфты, втулки, валики, крепежные детали, диски главного сцепления, шестерни поворотного механизма
50	Кованые шестерни, штоки, валы, оси, прокатные ватки, бегуны, колеса
55	Ковка и штамповка в горячем состоянии деталей, указанных для марки 50, а также эксцентрики и прокатные валки
60	Прокатные валки, эксцентрики, оси, шпиндели, бандажи, пружинные кольца, амортизаторы, пружины сцепления, шайбы, диски сцепления, регулировочные прокладки
65	Рессоры, пружины, проволока для канатов
70	Рессоры, пружины и бандажи локомотивов
15Г, 20Г	Ковка и штамповка; поршневые пальцы, кулачковые валики, тяги для рулевого управления, шарниры муфт, крылья вентиляторов, сварочные трубы
30Г	Крепежные изделия, переводные рычаги, рычаги сцепления, тормозные педали, вилки переключения передач, тяги рулевого управления

Продолжение табл. П2

1	2
40Г	Полуоси, распределительные валы, коленчатые валы, шатуны, передние оси и тормозные рычаги
50Г	Диски трения, шестерни непрерывного зацепления, шлицевые и шестеренные валы
60Г	Шайбы гровера, фрикционные диски, упорные кольца, пружины клапанные и амортизаторные, бандажи вагонные
65Г	Пружинные кольца, бандажи тендерные, скобы, шайбы гровера и пружины, закаленные в масле
10Г2	Сварные и штампованные детали, подмоторные рамы, узлы, косынки
30Г2	Полуоси, цапфы и оси крановых тележек, лонжероны
35Г2	Коленчатые валы, полуоси, цапфы
40Г2	Коленчатые валы, шатуны, валики моторов, скрепляющие кольца
45Г2, 50Г2	Полуоси, карданные валы, червяки, шатуны, оси трамвайные, вагонные и паровозные
15Х, 15ХА, 20Х, 20ХА	Шестерни, валики, червяки рулевого управления, распределительные валы, наконечники винта, поршневые, пальцы, шаровые пальцы рулевого управления, толкатели
30Х,30ХА	Балансиры, оси, подушки, шестерни, вал сошки руля, балки передней оси, поворотные кулаки и рычаги
35Х	То же, что и для марки 30Х, а также шестерни дифференциала, червяки и крепежные детали для тракторов
38ХА, 40Х,	Коленчатые валы, оси, шестерни, пальцы, рычаги, кривошипы, полуоси, защелки буксирного крюка, ключи гаечные, улучшаемые детали, поворотные кулаки, ведущие валки, всасывающие клапаны
45Х, 45ХА, 50Х, 50ХА	Валки для горячей прокатки, редукторные валы, шестерни, валики передач, упорные кольца, пружины
25Н, 25НА, 30Н, 30НА	Для тяжелого машиностроения: крупные поковки и листы повышенной вязкости
12МА, 15М	Кольца, изготовляемые из бесшовных труб, для подшипниковой промышленности
30М, 30МА	Детали турбин для тяжелого машиностроения: диафрагмы, диски и другие детали, работающие при температурах до 450°С, редукторы и поковки общего назначения для паротурбин
40ХГ, 40ХГА	Валы моторов, оси, шатуны, коленчатые валы, рычаги управления, винты
20ХФ, 20ХФА	Шестерни коробки передач заднего моста и червячной передачи, поршневые кольца, распределительные валики, толкатель клапана, кольца подшипников, трубопроводы высокого давления

Продолжение табл. П2

1	2
40ХФА	Для тяжелого и среднего машиностроения: коленчатые валы, нецементуемые шестерни, толкатели, азотируемые валики, пальцы, детали воздушных винтов (кронштейны, траверсы, болты), силовые шпильки, винты, шатуны, валы пропеллеров
50ХФА	Пружины, кольца для авто- и авиапромышленности
33ХС, 33ХСА	Детали высокой прочности и вязкости — оси, валы, балансиры. Пальцы трака
40ХС, 40ХСА	Торсионные валы, кривошипы
20ХМ, 20ХМА	Изготовление деталей, подлежащих цементации — шестерен, труб для котлов и перегревателей
30ХМ, 30ХМА	Для турбостроения: роторы, диски и другие детали; для среднего машиностроения: ведущие валы, оси, шарниры руля, болты сварные, детали из труб и листа, щеки кривошипа для мотоциклов
35ХМ, 35ХМА	Валы, роторы, диски, крепежные детали, паротурбины, коленчатые и трансмиссионные валы, буры, перфораторы, зажимные патроны, цапфы и шестерни
35Х2МА	Валы моторов, шатуны, валы, пропеллеры и высоконапряженные фитинги для авиастроения
20СГ	Для штамповок с повышенной вязкостью. Заменитель стали 25Н3 для деталей сечением до 30 мм
35СГ	Валы, шатуны, кривошипы
20ХН, 20ХНА	Шестерни для дизелей, для коробок скоростей, шпонки и валики контрприводов, пальцы поршня, шлицевые валики
40ХН, 40ХНА	Для тяжелого машиностроения: валы, шестерни, шаровые опоры, диски, роторы и валы паровых турбин, кронштейны маятников
50ХН	В моторостроении: детали крупных сечений и шестерни для закалки в масле
12ХН2, 12ХН2А	Детали крупных сечений, перечисленные в графе для марки 20ХН
12ХН3, 12ХН3А	Шестерни, поршневые пальцы, распределительные валики, оси, ролики, шпильки, винты, валики передач, упорные ролики, толкатели клапанов
20ХН3А	Шестерни, валики, втулки, болты, силовые, шпильки
30ХН3, 30ХН3А	Штоки, валы, шестерни, коленчатые валы, шатуны, пропеллерные валы, болты и фитинги
37ХН3А	Шестерни, барабаны, валики, втулки, пружины, шайбы
12Х2Н4, 12ХН3А	Наиболее ответственные цементуемые детали — шестерни, валики, ролики, пальцы поршня
25ХГС, 25ХГСА	Дышла, штоки, ответственные сварные и штампованные детали и узлы (из листов и труб)

Продолжение табл. П2

1	2
30ХГС, 30ХГСА	Валики, шестерни, оси, ролики, установочные кольца, крепеж, сварные и клепаные конструкции
35ХГС, 35ХГСА	Для ответственных деталей; заменители трехслойной стали для сельскохозяйственных отвалов и заменители марок, содержащих никель и молибден
38ХМЮА	Для тяжелого и среднего машиностроения: шестерни, валики, ролики, гильзы цилиндров, поковки для азотирования
35ХМФА	Детали, работающие при высоком напряжении: диски, роторы паротурбин, коленчатые валы двигателей невысокой мощности
18ХНВА	Детали, обладающие высокой прочностью: коленчатые валы, шестерни, валы редукторов, ответственные болты и силовые шпильки
25ХНВА	Валы и шатуны мотора, валы пропеллера, высоконапряженные фитинги и силовые шпильки
33ХН3МА	Для тяжелого машиностроения: роторы, диски, валы паровых турбин для работы при температурах не выше 450°, крепежные детали
ШХ9	Для шарикоподшипниковой промышленности: шарики до 24 мм, ролики и кольца до 17,5 мм
ШХ15	То же для шариков диаметром до 200 мм и роликов до 60 мм, для колец всех размеров
1Х13	Хорошая стойкость против атмосферной коррозии. Штоки, валы, турбинные лопатки, арматура крекинг-установок, поплавки бензобаков. Детали карбюраторов и предметы домашнего обихода
2Х13	То же, что для стали 1Х13, но в условиях более высоких напряжений
3Х13	Нержавеющие изделия высокой твердости: мерительный, режущий и хирургический инструменты. Высоконапряженные детали машин
4Х13	При атмосферной коррозии. Режущий, мерительный и хирургический инструменты, пружины, карбюраторные иглы, шарикоподшипники
Х17	В химической промышленности: абсорбционные башни, теплообменники, баки для хранения кислот, аппаратура для консервных заводов и фабрик-кухонь
Х25, Х28	Окалиностойкие и жароупорные детали, предназначенные для работы при температурах не выше 1150°С. В химической промышленности: аппаратура для хранения дымящей азотной и концентрированной серной кислоты
Х18	Нержавеющая. Шарикоподшипники для нефтяного оборудования, ножи высшего качества, втулки, вентили (другие детали, подвергающиеся сильному износу и обладающие повышенной стойкостью против коррозии)

Продолжение табл. П2

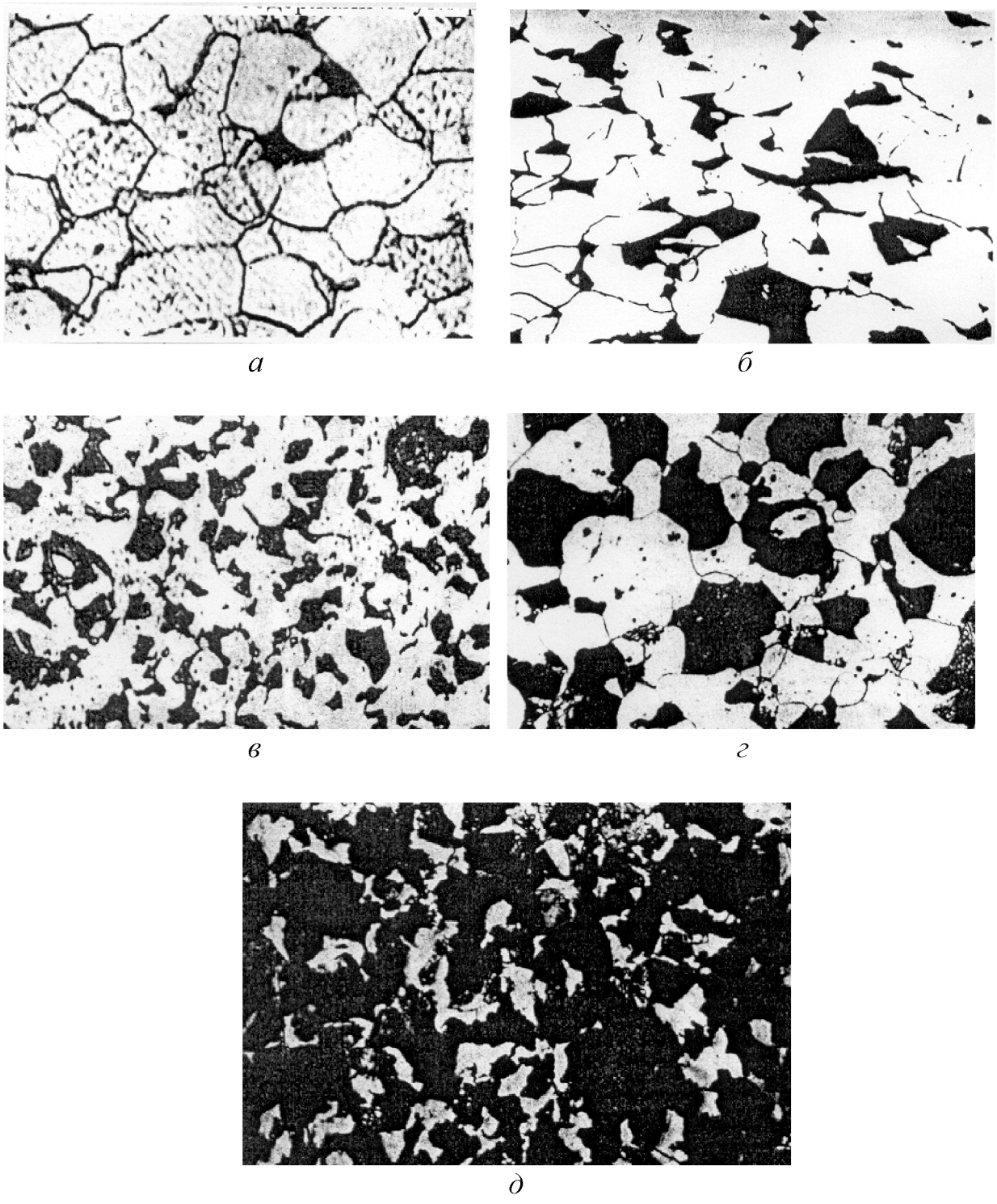
1	2
Х14	Обрабатываемые на автоматах детали, которые должны иметь гладкую поверхность и обладать повышенной стойкостью против истирания (винты, гайки, зубчатые колеса и другие нарезаемые детали)
1Х18Н9, 2Х18Н9	Кислотостойкая. Конструкционный материал для самолетов; поплавки гидросамолетов. Абсорбционные башни, теплообменники, баки для кислот
Х17Н2	Кислотостойка и окалиностойка. Оборудование азотнокислотных заводов (абсорбционные башни, теплообменники для горячих нитрозных газов и горячей азотной кислоты, баки для кислот, трубопроводы и пр.), оборудование кухонь, столовых, консервных заводов
Х23Н18	Окалиностойка до 1000°, жаропрочна, кислотостойка. Детали установки для конверсии метана, пиролиза газов, гидрогенизации
Х6С	Окалиностойка до 750°. Детали котлов, работающие с повышенной нагрузкой
Х9С2	Окалиностойка до 800°. Клапаны двигателей и слабо нагруженные детали, работающие при температуре до 800°
Х5М	Жаропрочна до 650°. Трубы, детали насосов, задвижки; подвески и опоры котлов
Х13Н7С2	Жаропрочна до 800°, окалиностойка. Клапаны двигателей
Х20Н14С2	Окалиностойка до 1000°, жаропрочна, кислотостойка; подвески и опоры в котлах
Х25Н20С2	Окалиностойка до 1100°, жаропрочна, кислотопрочна. Нагруженные детали печных конвейеров, ящики для цементации, крепежные детали, подверженные действию высоких температур и давлений
1Х18Н9Т	Кислотостойка, устойчива против межкристаллитной коррозии. В азотной промышленности: абсорбционные башни, теплообменники, баки для кислот, трубопроводы, аппаратура; в лакокрасочной: автоклавы, мешалки, перегонные кубы; в угольной: насосы и аппаратура для работы в кислотных шахтных водах; в молочной: аппаратура для переработки молока, бидоны, фляги; в пивоваренной: бродильные баки, бочки, чаны, различная аппаратура; в пищевой: посуда, оборудование кухонь и консервных заводов; патрубки и коллекторы выхлопной системы двигателей
4Х14Н14В2М	Жаропрочна до 800°, окалиностойка. Клапаны двигателей, детали паровых и газовых трубопроводов, лопатки
1Х14Н14В2М	Жаропрочна до 800°, окалиностойка. Детали пароперегревателей, работающие при высоких температурах и давлении

Окончание табл. П2

1	2
Х18Н11Б	Кислотостойка. Сварная аппаратура, которая после сварки не может быть термически обработана. Присадочный материал при сварке хромоникелевой стали
Х13Н4Г9	Устойчива против атмосферной коррозии (сталь подвержена межкристаллитной коррозии). Заменитель холоднокатаной стали марок 1Х18Н9, 2Х18Н9 для прочных и легких конструкций, соединяемых точечной электросваркой
Х6СМ, Х7СМ	Жаропрочны до 650^{O}, окалиностойки. Трубы, применяемые для крекингпроцессов в условиях сернистой коррозии, части насосов, задвижки, штоки
Х10С2М	Клапаны выпуска двигателей
Х18Н12М2Т	Кислотостойка, не склонна к межкристаллитной коррозии. Для деталей, устойчивых против сернистой, кипящей фосфорной, муравьиной и уксусной кислот. Детали аппаратуры, работающие в горячих растворах белильной извести и сульфитного щелока
Х18Н12М3Т	То же, а также окалиностойка и жаропрочна до 800°. Выпускные клапаны двигателей
Х14Н14СВ2М	Жаропрочна до 800°, окалиностойка. Выпускные клапаны двигателей моторов

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

СТРУКТУРА РЯДА СТАЛЕЙ ПОСЛЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ



а *б* *в* *г* *д*

Рис. П2. Структура конструкционной стали обыкновенного качества в равновесном состоянии с различным содержанием углерода (феррит и перлит): *а* – Ст1 (0,1% С), х200; *б* – Ст3 (0,21% С), х500; *в* – Ст4 (0,27% С), х200; *г* – Ст5пс (0,37% С), х200; *д* – Ст6 (0,44% С), х200

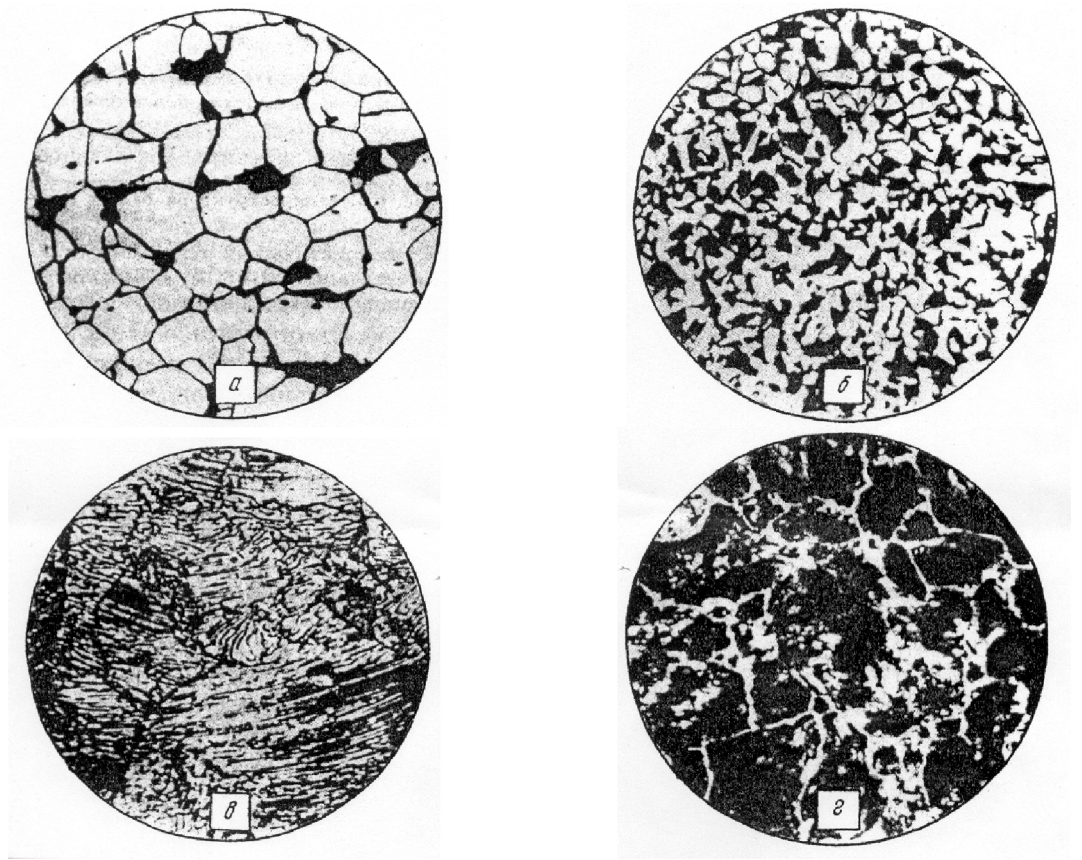


Рис. П3. Структура качественной конструкционной с различным содержанием углерода в равновесном состоянии (после отжига): *а* – Ст 10, сталь 40; *б* – сталь У8, У12 (0,21% С), х500; *в* – Ст4 (0,27% С), х200; *г* – Ст5пс (0,37% С), х200;

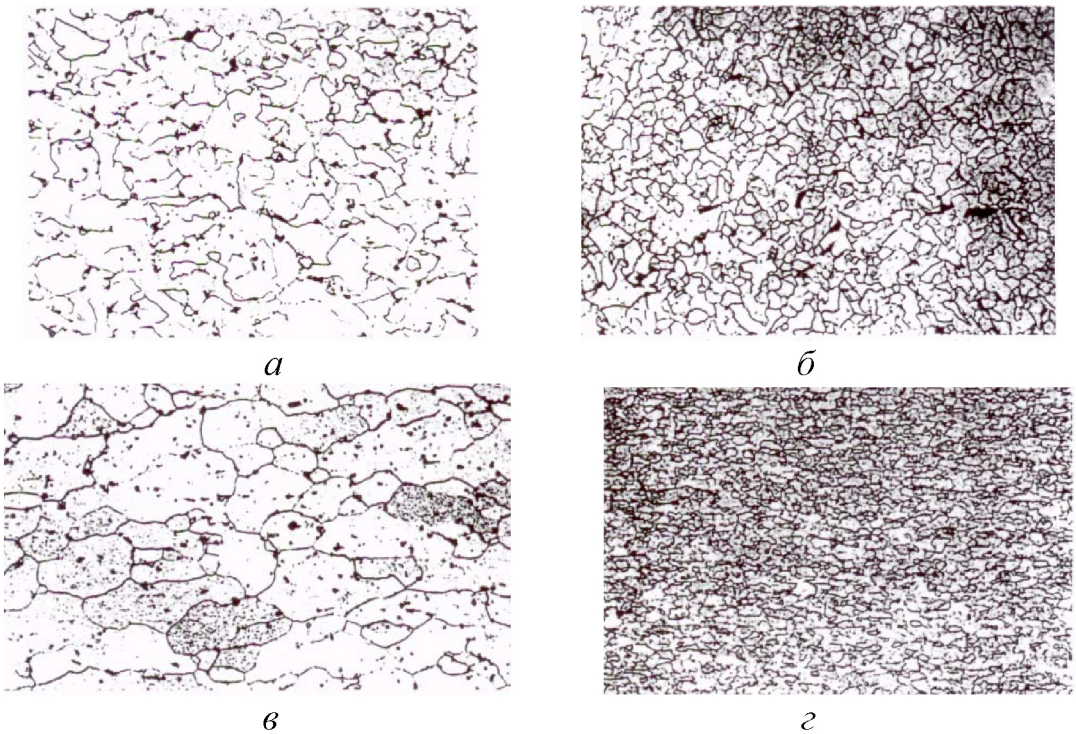
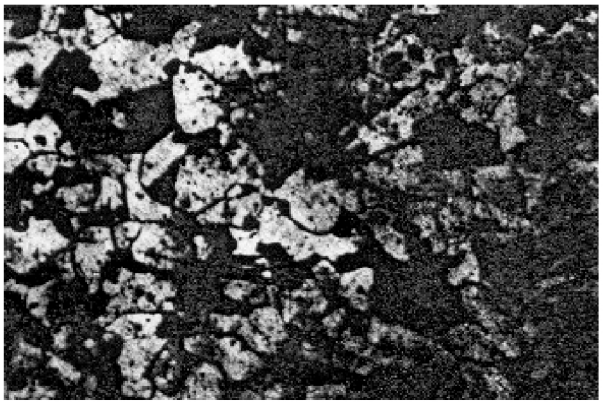


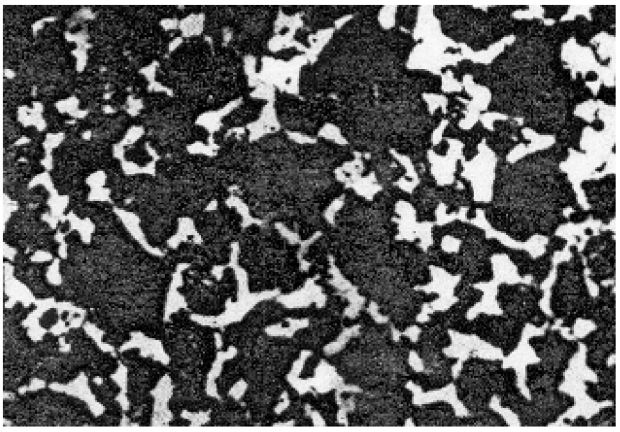
Рис. П4. Структура низкоуглеродистых сталей после отжига: *а* – Ст08ГСЮТ(Ф), отжиг, х500; *б* – Ст 08кп, отжиг, х100; *в* – Ст 08Ю, отжиг, х500; *г* – Ст 10ЮА, отжиг, х100



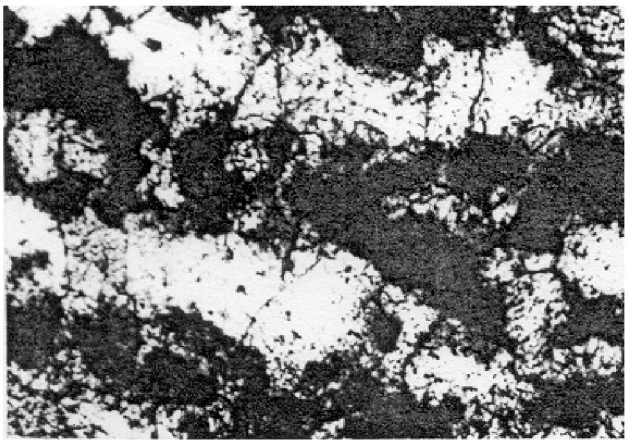
а

б

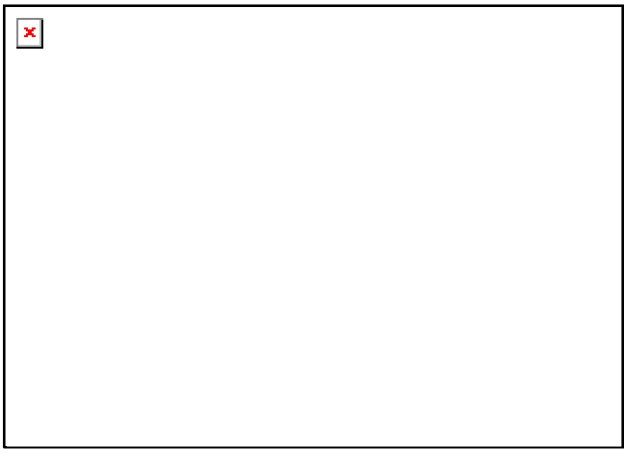
в



г

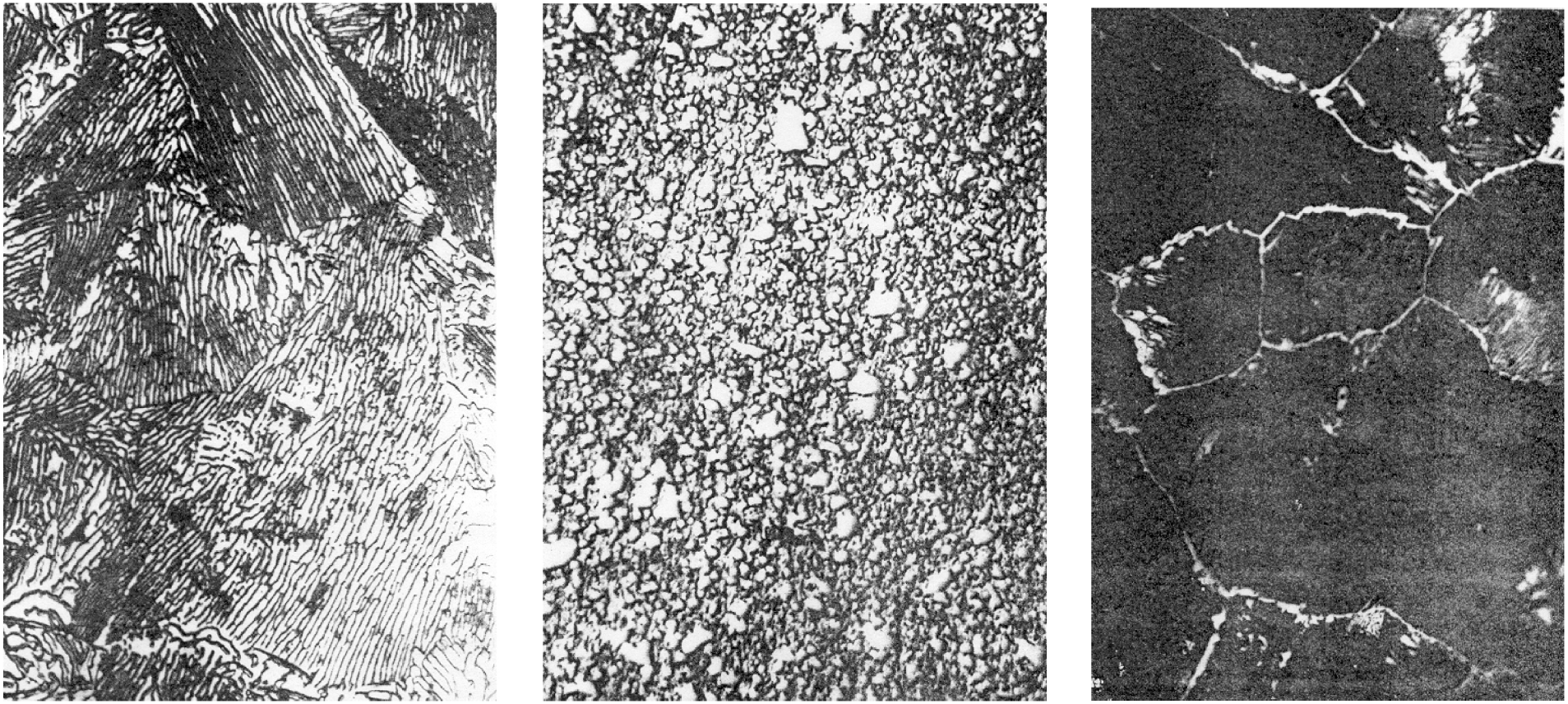


д



е

Рис.П5. Изменение структуры низкоуглеродистых сталей при отжиге и нормализации: *а* – мелкозернистая структура феррита и перлита в стали 45. Нагрев Ac_3+(30…50°С), охлаждение с печью. Механические свойства хорошие, х500; *б* – сильный перегрев. Крупнозернистая структура Видманштетта в стали 45. Феррит имеет игольчатое строение. Механические свойства очень низкие, х500; *в* – перегрев. Крупнозернистая структура феррита и перлита в стали 45. Механические свойства низкие, х500; *г* – сталь 45. Структура очень мелкозернистая (Ф+П). Нагрев Ac_3+(30…50°С), охлаждение на воздухе. Нормализация. Механические свойства высокие, х500; *д* – структура стали 35. Полный отжиг. Нагрев Ac_3+(30…50°С), охлаждение с печью, х500; *е* – структура стали 35. Изотермический отжиг. Нагрев Ac_3+(30…50°С), распад аустенита при 690°С, х500



а *б* *в*

Рис.П6. Структура инструментальных сталей в равновесном состоянии: *а* – перлит пластинчатый (Ф+Ц). Образуется из аустенита при охлаждении стали У8 (0,8%С), х500; *б* – перлит зернистый (Ф+Ц). Образуется в стали У8–У13 при сфероидизирующем отжиге. Нагрев 730–770°С, выдержка, охлаждение 25°/час, х500; *в* – перлит + цементит$_{II}$. Образуется в стали У9–У13 из аустенита при охлаждении. Сетка цементита начинает образовываться на линии GS, перлит – на линии PSK, х500

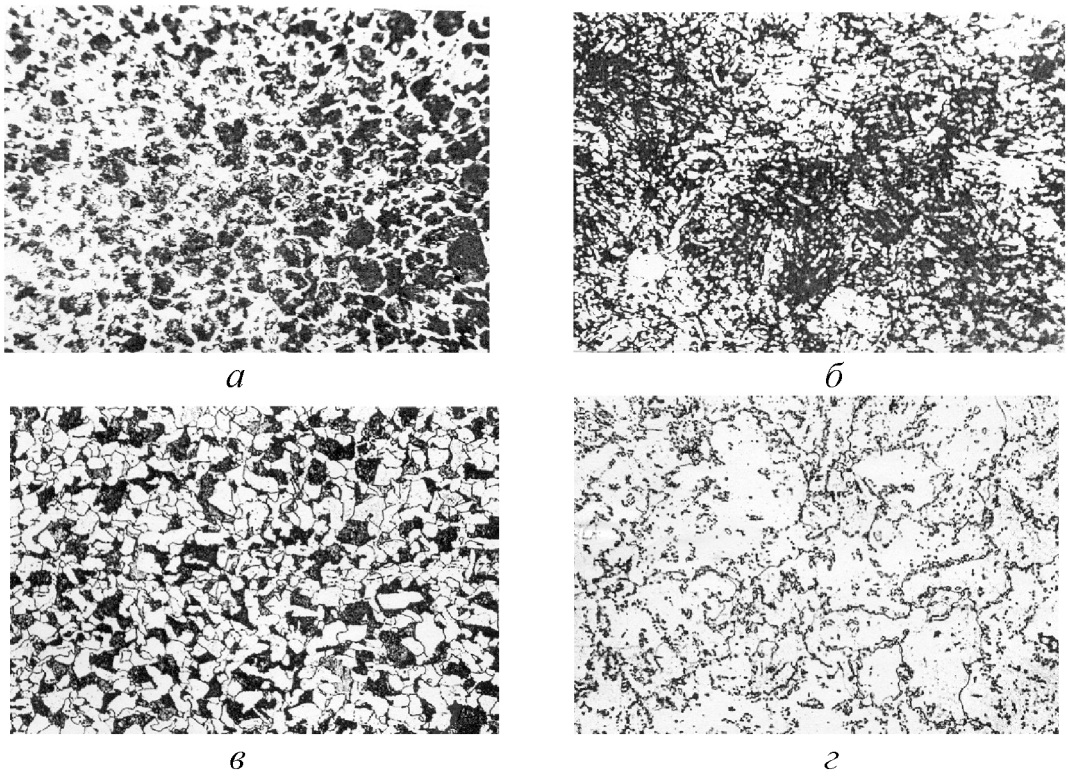


Рис.П7. Структура конструкционных легированных сталей при отжиге и нормализации: *а* – сталь 30ХГСА, нормализация, х200; *б* – сталь 178ХНВА, нормализация, х500; *в* – сталь 16ХГ, полный отжиг, х100; *г* – сталь 20Г2Ф, сфероидизирующий отжиг, х500

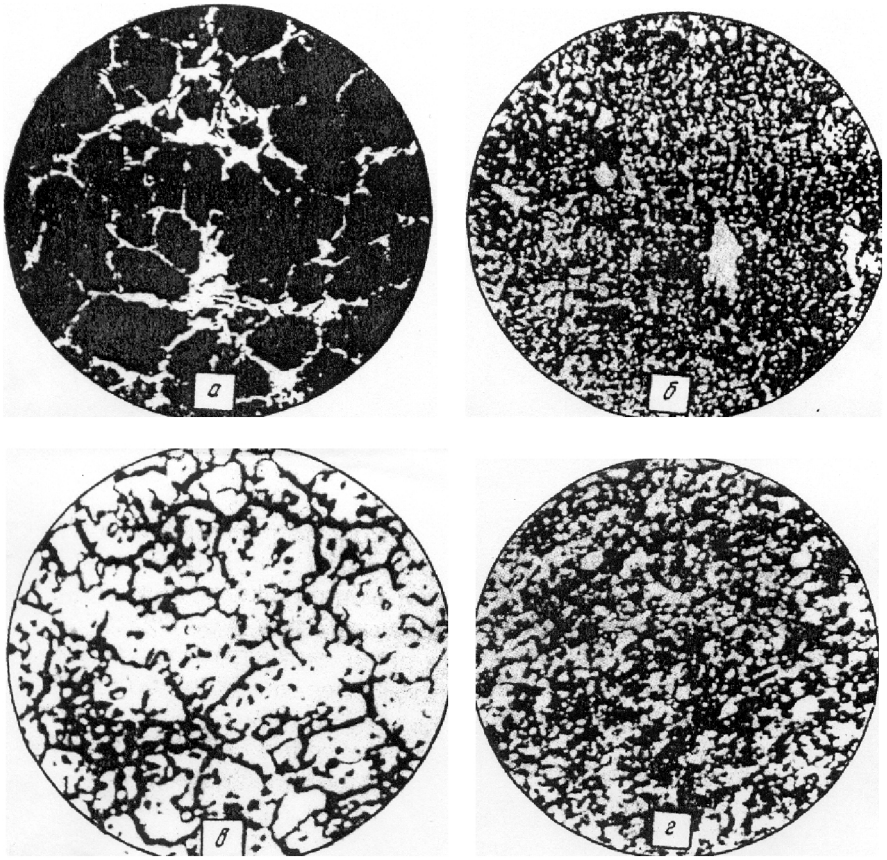
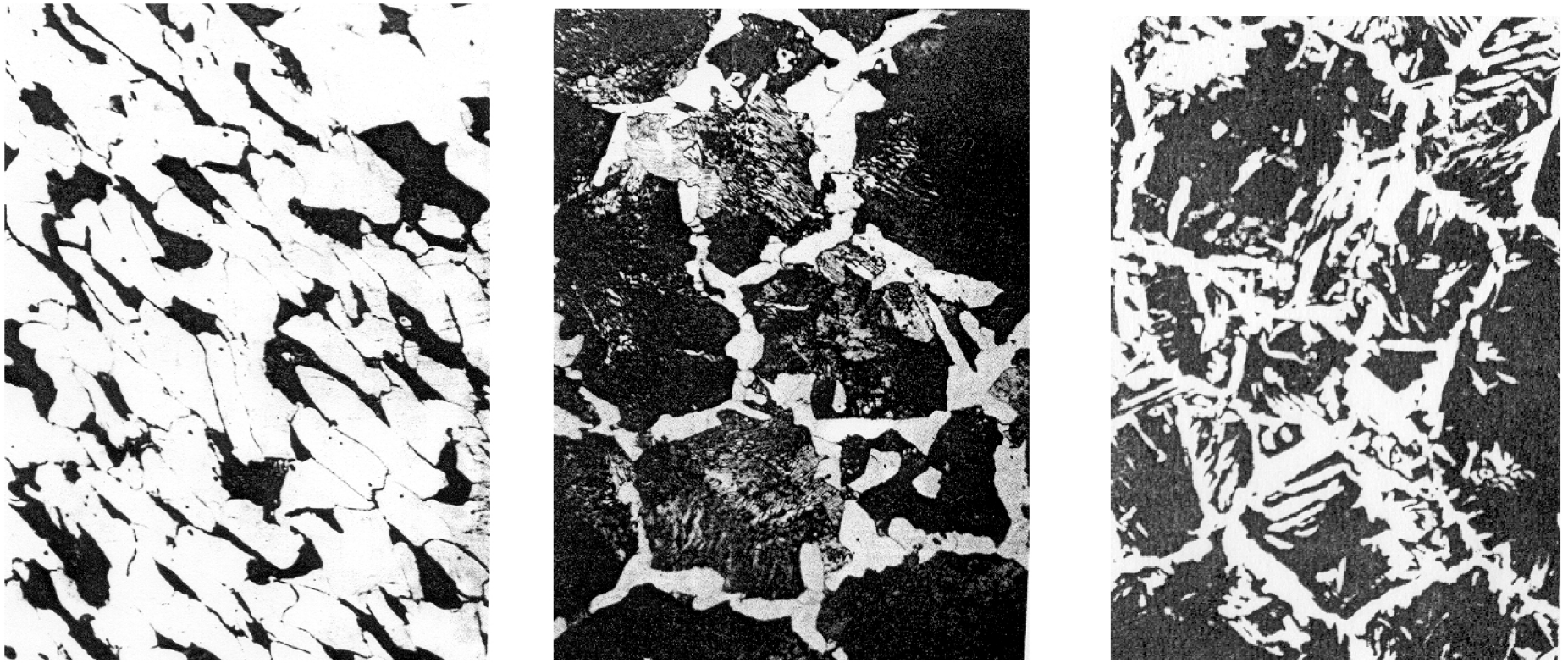


Рис.П8. Микроструктура быстрорежущей стали Р6М5: *а* – литое состояние, *б* – после ковки и отжига, *в* – после закалки, *г* – после отпуска. х500



а *б* *в*

Рис.П9. Влияние деформации и нагрева на структуру стали: *а* – строчечная структура. Получена при высокой степени деформации в холодном состоянии. Обладает неудовлетворительными механическими свойствами, высокой анизотропностью, х500; *б* – крупнозернистая структура. Феррит располагается по границам зерен перлита. Механические свойства низкие. Получена при горячей деформации, х500; *в* – сильный перегрев. Крупнозернистая структура Видманштетта в стали 45, х500

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Арзамасов, Б.Н. Материаловедение: учебник для вузов / Б.Н. Арзамасов, В.Н. Макарова, Г.Г. Мухин [и др.], под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МГТУ им. Баумана, 2001. – 648с.

2. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин [и др.] – М.: Машиностроение, 1989. – 640с.

3. Справочник по авиационным материалам. Т.1. Конструкционные стали, чугуны и припои / отв. ред. А.Т. Туманов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1965. – 515с.

4. Ковка и штамповка цветных металлов: справочник / Н.И. Корнеев, В.М. Аржаков, Б.Г. Бармашенко [и др.] – М.: Машиностроение, 1971. – 232с.

5. Микляев, П.Г. Сопротивление деформации и пластичность алюминиевых сплавов: справочник / П.Г. Микляев, В.М. Дуденко. – М.: Металлургия, 1979. – 183с.

6. Журавлев, В.Н. Машиностроительные стали: справочник / В.Н. Журавлев, О.Н. Николаева. – М.: Машиностроение, 1992. – 480с.

7. Ершов, В.И. Справочник кузнеца-штамповщика / В.И. Ершов, В.В. Уваров, А.С. Чумадин [и др.] – М.: Изд-во МАИ, 1996. – 352с.

8. Горелик, С.С. Рекристаллизация металлов и сплавов. 2-е изд. / С.С. Горелик. – М.: Металлургия, 1978. – 568с.

9. Термическая обработка в машиностроении: справочник / под ред. Ю.М. Лахтина и А.Г. Рахштадта. – М.: Машиностроение, 1980. – 783с.

10. Брюханов, А.Н. Ковка и объемная штамповка. 2-е изд., перераб. и доп. / А.Н. Брюханов. – М.: Машиностроение. 1975, – 408с.

11. Бойцов, В.В. Горячая объемная штамповка / В.В. Бойцов, И.Д. Трофимов. – М.: Высш. шк., 1982. – 270с.

12. Семенов, Е.И. Ковка и объемная штамповка / Е.И. Семенов. – М.: Высшая школа, 1972. – 352с.

13. Ковка и штамповка: справочник: в 4т. / под ред. Е.И. Семенова и др. – М.: Машиностроение, 1985. Т.1. – 586с.

14. Шмыков, А.А. Справочник термиста. 2-е изд., доп. и исправл. / А.А. Шмыков. – М.: Машгиз, 1958, 287с.

15. Бельский, Е.И. Справочное пособие кузнеца-штамповщика / Е.И. Бельский, В.И. Казаченко. – Минск: Гос. изд-во БССР. 1960. – 490с.

16. Фетисов, Г.П. Материаловедение и технология металлов / Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюнин [и др.] – М.: Высшая школа. 2000. – 638с.

17. Гуляев, А.П. Материаловедение: учеб. для вузов. 6-е изд., перераб. и доп. / А.П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1986. – 544с.

18. Башнин, Ю.А. Технология термической обработки / Ю.А. Башнин, Б.К. Ушаков, А.Г. Секей. – М.: Металлургия, 1986, 424с.

19. Соколов, К.Н. Технология термической обработки и проектировании термических цехов / К.Н. Соколов, И.К. Коропич. – М.: Металлурги, 1988, 584с.

20. Гуляев, А.П. Инструментальные стали: справочник. 2-е изд., перераб. и доп. / А.П. Гуляев. – М.: Машиностроение, 1975. – 272с.

21. Мальцев, М.В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов / М.В. Мальцев. – М.: Металлургия, 1970, 364с.

22. Колачев, Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов / Б.А. Колачев, В.А. Ливанов, В.И. Елагин. – М.: Металлургия, 1981, 416с.

23. Новиков, И.И. Термическая обработка металлов и сплавов / И.И. Новиков, М.В. Захаров. – М.: Металлургиздат, 1962, 429с.

24. Справочник по алюминиевым сплавам / под ред. В.И. Елагина. – М.: ВИЛС, 1978. – 132с.

25. Промышленные алюминиевые сплавы: справ. изд. / М.Б. Альтман, С.М. Амбарцумян [и др.] 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1984. – 528с.

26. Гудков, С.И. Механические свойства цветных металлов при низких температурах / С.И. Гудков. – М.: Металлургия, 1971. – 304с.

27. Магниевые сплавы: в 2 т. Справочник. Т.2. Технология производства и свойства отливок и деформированных полуфабрикатов / под ред. И.И. Гурьева, М.В. Чухрова. М.: Металлургия, 1978, 269с.

28. Титановые сплавы в машиностроении / под ред. Г.И. Капырина. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-е, 1977. – 248с.

Учебное издание

Уваров Вячеслав Васильевич
Уварова Вера Сергеевна
Носова Екатерина Александровна

ТЕРМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ КОВКИ, ШТАМПОВКИ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Учебное пособие

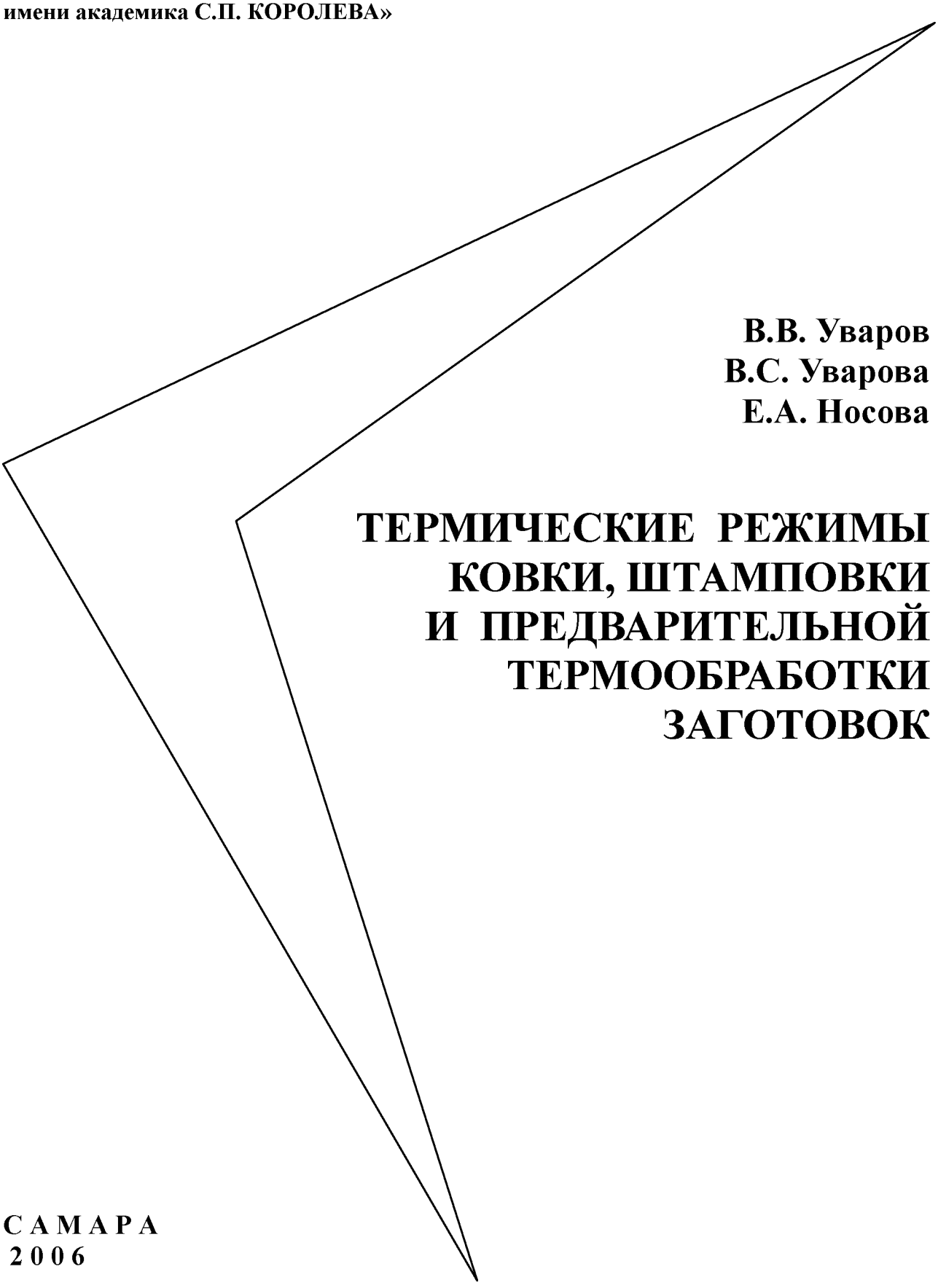
Редактор Т. И. К у з н е ц о в а
Компьютерная верстка Т. Е. П о л о в н е в а

Подписано в печать 20.04.06 г. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 4,8. Усл. кр.-отт. 5,0. Уч.-изд.л. 5,5.
Тираж 200 экз. Заказ .

Самарский государственный
аэрокосмический университет.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

РИО Самарского государственного
аэрокосмического университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени академика С.П. КОРОЛЕВА»



В.В. Уваров
В.С. Уварова
Е.А. Носова

ТЕРМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ КОВКИ, ШТАМПОВКИ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

САМАРА
2006