

# Обработка газовой экструзией термически упрочняемых сталей и сплавов в режиме деформационно-термического упрочнения

В. Д. Бербенцев

Термически упрочняемые сплавы на основе железа (сталь 50ХФА), титана (BT-14) и алюминия (D16) подвергали деформации газовой экструзией с локальным нагревом в режиме деформационно-термического упрочнения со степенями деформации 90 % и более, с получением на выходе тонкой проволоки. Газоэкструзию проводили при различных сочетаниях параметров обработки — давление газа, температура деформации, скорость экструзии. Проволоку, деформированную при различных сочетаниях параметров обработки, охлаждали на воздухе, подвергали отпуску или старению и испытаниям на разрыв. Определены механические свойства исходных, недеформированных, а также термообработанных и нетермообработанных сплавов. На всех обработанных газоэкструзией сплавах механические свойства превышали исходные как по прочности, так и по пластичности. Определяющее влияние на сочетание прочности и пластичности сплавов, обработанных газоэкструзией, оказывает сочетание параметров газоэкструзии — давление газа, температура деформации, скорость экструзии.

**Ключевые слова:** газоэкструзия, деформация, давление, температура, скорость, прочность, пластичность, сплавы, обработка, проволока, закалка, отпуск, старение.

DOI: 10.30791/1028-978X-2021-7-76-84

## Введение

В процессах горячей обработки металлов давлением (прокатка, прессование и др.) совмещение пластической деформации и термической обработки придаёт обработанным материалам повышенный комплекс механических свойств (прочность и пластичность). Такие режимы называют высокотемпературной термомеханической обработкой (ВТМО) или деформационно-термической обработкой (ДМО) [1 – 3].

В работах [4, 5] режим термомеханической обработки был также реализован в процессе высокотемпературной газовой экструзии. Заготовки из конструкционных сталей типа ХНМС (хром – никель – марганец – кремний), нагретые в камере высокого газового давления в среде инертного газа до температур аустенизации 800 – 900 °С, выдавливали газом высокого давления со степенью деформации 20 – 40 %, после чего деформированные газоэкструзией прутки подвергали закалке в

водяной ванне и последующему отпуску при температуре 200 °С в течение 1 часа. Механические свойства полученных образцов были выше по прочности и пластичности, чем после аналогичной обработки прокаткой при тех же температурах и степенях деформации.

В этих работах показано влияние высокотемпературной газовой экструзии в режиме деформационно-термического упрочнения на комплекс механических свойств обрабатываемых материалов, но также выявлены ограничения технологических возможностей применённой схемы нагрева и экструзии, а именно: низкие предельно-возможные степени деформации, неустойчивый, скачкообразный характер процесса экструзии, ограниченные длины применяемых заготовок, трудности приёма и сохранения получаемых изделий.

Проведённые работы по модернизации процесса и оборудования позволили существенно расширить возможности этого процесса. Благодаря применению локального нагрева и нагреваемой

матрицы [6] процесс газовой экструзии приобрёл устойчивость и получена возможность регулирования по скорости экструзии и по температуре деформации [7]. Существенно увеличились также возможности газовой экструзии по степени деформации (90 % и выше), что позволило получать изделия тонкого сечения в виде проволоки и тонких стержней за одну операцию. Работ по деформационно-термическому упрочнению при таких больших степенях деформации с получением изделий в виде тонкой проволоки в литературе не имеется.

Цель настоящей работы — проведение деформационно-термического упрочнения при больших степенях деформации на конструкционной стали 50ХФА, титановом сплаве ВТ-14 и алюминиевом сплаве Д-16.

### Методика эксперимента

Газовую экструзию исследуемых сплавов проводили на газоэкструзионной установке ГЭУ-3 конструкции Института физики высоких давлений (ИФВД), включающей камеру высокого газового давления, в полости которой размещены нагреваемая до температуры деформации матрица, выполненная из жаропрочных сплавов, короткий нагреватель, окружающий деформирующую часть матрицы, деформируемую заготовку, введённую в матрицу и уплотнённую в её цилиндрическом пояске. Газовое давление в камере создавали газовым компрессором высокого давления ГК-5 конструкции ИФВД. После создания давления заданной величины включением нагревателя заданной мощности повышали температуру деформируемой части заготовки до определённого уровня, при этом скорость экструзии достигала определённого значения. При изменении мощности нагревателя температура деформации и скорость экструзии достигали новых установившихся значений. Таким образом, на деформированном изделии (проволоке) имелись участки, полученные газоэкструзией при различных сочетаниях давления, температуры и скорости обработки. На выходе из камеры деформированную проволоку охлаждали на воздухе, ввиду малого размера сечения проволоки считали, что скорость её охлаждения близка к закалочной для данных сплавов. Давление газа в камере измеряли по показаниям стрелочного манометра, размещённого на входе в камеру, температуру деформации — по показаниям термопары хромель-алюмель, спай которой находился на выходе деформированной проволоки из матрицы, скорость экструзии — с помощью тонкой металлической

нити, один конец которой был закреплён на переднем конце заготовки, деформируемой в проволоку, а к другому концу прикреплён грузик, перемещающийся вдоль вертикальной линейки. Полученную после деформации проволоку разрезали на части с известным набором параметров, подвергали отпуску или старению, после чего из них изготавливали шлифованием разрывные образцы и испытывали на разрыв на разрывной машине Р-5.

### Результаты и обсуждение

#### Конструкционная сталь 50ХФА

Конструкционную сталь 50ХФА подвергали термической обработке: закалке из аустенитного состояния при температурах выше  $A_{c3} = 860$  °С с охлаждением в масле и с последующим отпуском при температуре 200 °С. Тонкая проволока из этой стали применяется в пружинах, стержневых деталях машин, иглах и пр.

В данной работе сталь 50ХФА в горячекатаном состоянии, в заготовках диаметром 6 мм подвергали газоэкструзии в проволоку диаметром 1 мм с вытяжкой 36 (степенью деформации 97,2 %). Экструзию проводили по трём различным режимам, отличающимся сочетанием параметров обработки — давления, температуры и скорости. После экструзии выходящую из матрицы проволоку охлаждали на воздухе. Ввиду малого сечения проволоки считали, что скорость её охлаждения на воздухе достаточна для закалки. Полученную проволоку разрезали на части, обработанные при различных сочетаниях параметров, подвергали отпуску при температурах от 100 до 500 °С и полученные образцы испытывали на разрыв. Результаты механических свойств стали 50ХФА, подвергнутой обработке газоэкструзией по различным режимам и последующему отпуску при различных температурах и без отпуска представлены в табл. 1. Для сравнения в табл. 1 есть данные по механическим свойствам образцов этой стали в исходном, недеформированном состоянии, после стандартной закалки и отпуска до тех же температур.

Результаты испытаний исследуемых образцов стали 50 ХФА на разрыв представлены на рис. 1 и 2.

Зависимости предела прочности и относительного удлинения при разрыве образцов стали 50ХФА, полученных газоэкструзией при различных режимах и после обычной закалки, от температуры отпуска показаны на рис. 1, где можно видеть, что прочность газоэкструдированной ста-

Механические свойства образцов стали 50ХФА, подвергнутой деформации газокструзией по трём режимам и отпуску при различных температурах и исходной стали, подвергнутой закалке и отпуску.

Table 1

Mechanical properties of samples of 50 Cr – V – N type steel subjected to deformation by gas extrusion in three modes and tempering at different temperatures and the initial one subjected to quenching and tempering

Режим газокструзии	Температура отпуска, °С	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, $\delta$ , %
Режим 1. Давление газа 550 – 600 МПа, температура деформации 940 – 1000 °С, скорость экструзии 20 – 30 мм/с	Без отпуска	2550	1,5
	100	2520	2,1
	200	2280	11,5
	300	2040	10,1
	400	1820	11,2
	500	1470	14,3
Режим 2. Давление газа 670 – 700 МПа, температура деформации 850 – 880 °С, скорость экструзии 60 – 70 мм/с	Без отпуска	2620	1,8
	100	2570	3,1
	200	2330	13,0
	300	2090	11,8
	400	1830	12,1
	500	1510	15,0
Режим 3. Давление газа 760–800 МПа, температура деформации 730 – 770 °С, скорость экструзии 100 – 200 мм/с	Без отпуска	2710	0,4
	100	2650	1,1
	200	2500	8,0
	300	2210	8,1
	400	1910	8,4
	500	1560	13,7
Исходное состояние, закалка от 860 °С	Без отпуска	2440	0,4
	100	2400	1,5
	200	2160	10,0
	300	1900	9,0
	400	1710	9,5
	500	1390	14,1

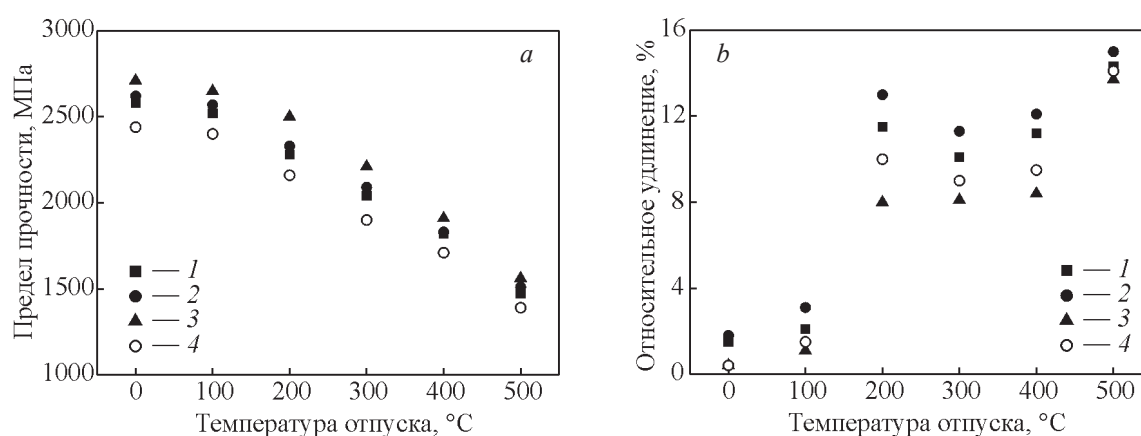


Рис. 1. Зависимости: *a* — предела прочности, *b* — относительного удлинения при разрыве образцов стали 50ХФА, полученных газокструзией по различным режимам: 1 — 1, 2 — 2, 3 — 3, а также после обычной закалки от температуры отпуска (4).

Fig. 1. Dependences of the tensile strength (*a*) and elongation (*b*) at break of 50 Cr – V – N type steel samples obtained by gas extrusion under various conditions: 1 — 1, 2 — 2, 3 — 3, and after conventional quenching on the tempering temperature (4).

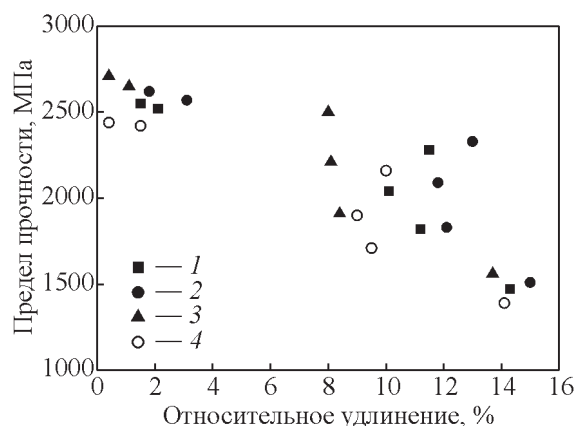


Рис. 2. Сравнение комплексов механических свойств стали 50ХФА после различных режимов обработки: : 1 — 1, 2 — 2, 3 — 3, а также после обычной закалки от температуры отпуска (4) в координатах прочность — пластичность.

Fig. 2. Comparison of complexes of mechanical properties of 50 Cr – V – N type steel after various processing modes: : 1 — 1, 2 — 2, 3 — 3, and after conventional quenching on the tempering temperature (4) in the strength-ductility coordinates.

ли выше исходной на всех трёх режимах газозэкструзии и температурах отпуска, а пластичность больше на режимах 1 и 2, но меньше на режиме 3. Более наглядно сравнение комплексов механических свойств после различных режимов обработки можно сделать в координатах прочность — пластичность (рис. 2). Сравнение показывает, что наилучшим комплексом механических свойств обладает сталь, обработанная по режиму 2 и отпущенная при температуре 200 °С.

#### Титановый сплав VT-14

Титановый сплав VT-14 (масс. %: Al — 6,1, Mo — 2,5, V — 1,5, Fe — 0,16, ост. — Ti) подвергали упрочняющей термообработке по режиму: закалка от 860 °С в воду, старение при 520 °С в течении 8 ч.

Исходные горячекатаные заготовки из этого сплава диаметром 7 мм подвергали газозэкструзии в проволоку диаметром 1,4 мм с вытяжкой 25 (степень деформации 96 %) через матрицу из сплава ВК-4. Газозэкструзию проводили в четырёх фиксированных диапазонах газовых давлений, МПа: 350 – 370, 450 – 470, 550 – 570 и 700 – 720. В каждом диапазоне давлений при повышении мощности локального нагрева во время экструзии повышали температуру деформации и скорость экструзии и

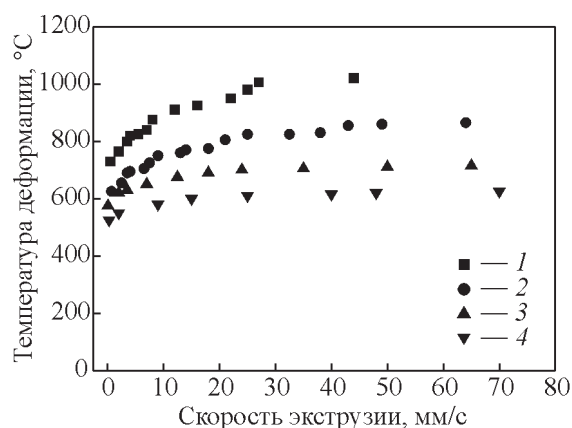


Рис. 3. Параметры газовой экструзии сплава VT-14 при различных значениях диапазонов давлений, МПа: 1 — 350, 2 — 450, 3 — 550, 4 — 700.

Fig. 3. Parameters of VT-14 type titanium alloy gas extrusion at various pressure ranges, МPa: 1 — 350, 2 — 450, 3 — 550, 4 — 700.

таким образом получали участки деформированной проволоки с различным сочетанием параметров обработки. Деформированную проволоку на выходе из матрицы охлаждали на воздухе, скорость её охлаждения приближённо равнялась закалочной. Деформированную и охлаждённую проволоку разрезали на части с различным сочетанием параметров обработки, подвергали старению при температуре 520 °С в течении 8 ч и последующему испытанию на разрыв. Параметры обработки, а также результаты разрывных испытаний на прочность и пластичность представлены в табл. 2. Для сравнения внесены данные по механическим свойствам образцов исходного термообработанного по стандартному режиму и исходного нетермообработанного сплавов.

В табл. 2 каждому сочетанию параметров обработки соответствует определённое сочетание прочности и пластичности. Табл. 2 использовали для анализа взаимозависимостей параметров экструзии в координатах температура деформации — скорость экструзии (рис. 3), где наглядно видно расположение рядов, объединяющих сочетания температуры и скорости экструзии при различных значениях диапазонов давлений, а также для сравнения комплекса механических свойств этого сплава, обработанного по различным режимам газозэкструзии и исходного в координатах прочность — пластичность (рис. 4).

Анализируя данные, можно сделать следующие выводы: 1) газозэкструдированный сплав

Механические свойства образцов титанового сплава VT-14, обработанного газожеструзией, и исходного, термообработанного и исходного нетермообработанного

Table 2

Mechanical properties of samples of VT-14 type titanium alloy, treated by gas extrusion, and the initial, heat-treated and initial non-heat-treated

Параметры газожеструзии			Механические свойства		
Давление газа, МПа	Температура деформации, °С	Скорость жеструзии, мм/с	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, δ, %	Относительное сужение, ψ, %
350 – 370	730	0,5	1121	16,2	51,5
	765	2,0	1152	15,0	50,1
	800	3,5	1160	14,8	49,3
	620	4,0	1168	14,1	40,3
	825	5,5	1175	13,5	34,3
	840	7,0	1245	11,9	31,7
	875	8,0	1256	10,5	30,9
	910	12	1304	7,0	28,5
	925	16	1329	6,8	26,1
	950	22	1342	6,2	25,5
	980	25	1361	5,6	21,5
1005	27	1386	5,9	20,0	
1020	44	1382	4,8	17,5	
450 – 470	625	0,7	1145	16,1	61,8
	655	2,5	1181	15,7	60,9
	690	3,5	1182	14,3	58,0
	695	4,0	1208	14,0	55,5
	705	6,5	1252	12,5	53,9
	725	7,5	1275	11,0	50,1
	750	9,0	1309	10,9	49,2
	760	13,0	1317	10,2	47,9
	770	14,0	1338	8,3	46,0
	775	18,0	1371	8,0	44,5
	805	21,0	1389	7,4	44,0
	815	25,0	1394	8,2	44,2
	825	32,5	1395	7,1	41,8
	830	38,0	1413	6,9	40,0
	855	43,0	1427	7,0	39,2
860	49,0	1449	6,5	31,4	
865	64,0	1452	5,8	28,4	
550 – 570	575	0,1	1130	17,1	62,5
	620	2,0	1185	15,8	60,2
	630	3,5	1221	14,0	58,8
	650	7,0	1306	12,5	54,7
	675	12,5	1360	11,2	52,1
	690	18,0	1402	9,9	47,0
	700	24,0	1428	9,1	44,3
	705	35,0	1445	8,5	42,8
	710	50,0	1457	8,3	42,1
	715	65,0	1468	7,5	40,5
700 – 720	525	0,3	1180	16,5	66,5
	550	2,0	1253	15,3	64,5
	580	9,0	1375	12,7	63,8
	600	15,0	1415	12,5	62,2
	610	25,0	1474	11,0	61,5
	615	40,0	1477	9,3	58,7
	620	48,0	1485	8,9	53,6
	625	70,0	1489	9,0	51,8
Исходный нетермообработанный			1112	11,0	53,4
			1110	10,1	50,8
			1125	8,2	56,0
Исходный термообработанный			1450	6,8	42,8
			1475	6,5	49,0
			1465	6,2	45,1

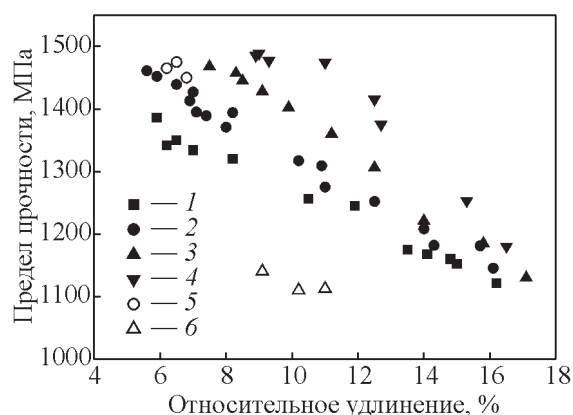


Рис. 4. Сравнение механических свойств сплава VT-14 после различных режимов обработки в координатах прочность – пластичность: 1 — газокструзия в диапазоне давлений 350 – 370 МПа; 2 — диапазон давлений 450 – 470 МПа; 3 — диапазон давлений 550 – 570 МПа; 4 — диапазон 700 – 720 МПа; 5 — исходный термообработанный сплав; 6 — исходный нетермообработанный сплав.

Fig. 4. Comparison of mechanical properties of VT-14 type alloy after various processing modes in the strength-ductility coordinates: 1 — gas extrusion in the pressure range 350 – 370 MPa; 2 — pressure range 450 – 470 MPa; 3 — pressure range 550 – 570 MPa; 4 — range 700 – 720 MPa; 5 — initial heat-treated alloy, 6 — initial non-heat-treated alloy.

VT-14 при всех сочетаниях давлений, температур и скоростей как по прочности, так и по пластичности превосходит исходный нетермообработанный сплав, но не при всех сочетаниях параметров превосходит исходный термообработанный сплав; 2) при низких давлениях (300 – 400 МПа) и высоких температурах экструзии (900 – 1000 °C) газокструдированный сплав уступает по механическим свойствам исходному термообработанному сплаву, а при высоких давлениях (500 – 700 МПа) и умеренных температурах экструзии (600 – 800 °C) превышает его как по прочности, так и по пластичности; 3) с повышением температуры деформации и скорости экструзии в фиксированном диапазоне давлений прочность сплава повышается, а пластичность снижается; 4) с повышением давления область механических свойств смещается в сторону более высокой пластичности; 5) из всех опробованных сочетаний параметров наибольшая прочность и пластичность (150/9), одновременно превышающие прочность и пластичность исходного и термообработанного сплава (144/6,3) были получены при давлении газа 700 °C 720 МПа, температуре 600 – 700 °C и скорости выхода проволоки при экструзии 60 – 70 мм/с.

Таблица 3

Механические свойства образцов алюминиевого сплава Д-16, обработанного газокструзией, и исходного, термообработанного и исходного нетермообработанного

Table 3

Mechanical properties of D-16 type aluminum alloy, treated by gas extrusion, and the initial, heat-treated and initial non-heat-treated

Параметры газокструзии			Механические свойства		
Давление газа, МПа	Температура деформации, °C	Скорость экструзии, мм/с	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, δ, %	Относительное сужение, ψ, %
200 – 220	325	0,5	374	23,8	41,8
	380	3,0	424	23,0	40,2
	410	6,0	448	21,5	35,0
	430	9,0	494	19,8	31,9
	470	13,0	584	16,0	25,0
400 – 420	275	0,2	350	24,5	44,6
	330	2,5	397	24,0	41,8
	380	7,5	438	22,6	39,7
	400	14,5	513	18,5	28,0
	430	21,5	557	17,1	25,3
	480	32,0	635	13,2	22,8
Исходные нетермообработанные			343	23,1	45,1
			368	23,2	43,9
			351	22,0	44,0
Исходные термообработанные			465	18,5	36,7
			474	17,2	33,0
			507	16,7	32,4

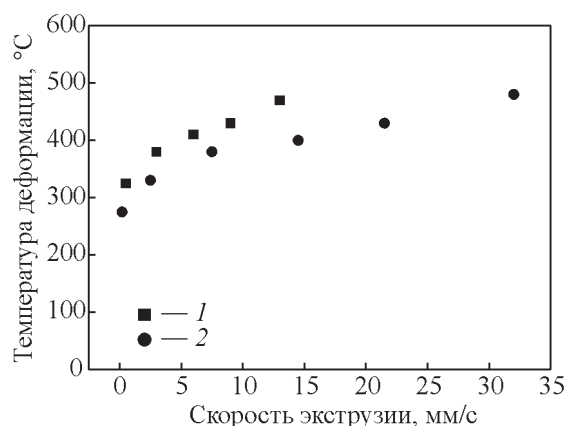


Рис. 5. Параметры газовой экструзии сплава Д16 в диапазоне давлений, МПа: 1 — 200 – 220, 2 — 400 – 420.

Fig. 5. Parameters of gas extrusion of D16 type alloy in the pressure range, MPa: 1 — 200 – 220; 2 — 400 – 420.

### Алюминиевый сплав Д-16

Алюминиевый сплав Д-16 (масс. %: Cu — 4,2, Mg — 1,4, Mn — 0,35, Fe — 0,15, Si — 0,21, Zn — 0,05, ост. Al) подвергается упрочняющей термообработке по режиму: закалка от 500 °С в воду и естественное старение в течение 4 – 5 суток. Прочность при закалке увеличивается с 30 до 47 кг/мм<sup>2</sup>.

Исходные горячекатаные заготовки из сплава Д-16 диаметром 8 мм подвергали газовой экструзии в проволоку диаметром 1,7 мм с вытяжкой 22 и степенью деформации 95,5 % через матрицу из сплава ВК-4. Газовую экструзию проводили в двух фиксированных диапазонах газовых давлений, МПа: 200 – 220 и 400 – 420. Так же как при экструзии сплава ВТ-14 в каждом диапазоне давлений при повышении мощности локального нагрева во время экструзии повышали температуру деформации и скорость экструзии и таким образом получали участки деформированной проволоки с различным сочетанием параметров обработки. Деформированную проволоку на выходе из матрицы охлаждали на воздухе, скорость охлаждения приближённо равнялась закалочной. Проволоку разрезали на части с различным сочетанием параметров обработки, подвергали старению и последующему испытанию на разрыв. Параметры обработки и результаты испытаний представлены в табл. 3. Для сравнения в табл. 3 внесены данные по свойствам исходного термообработанного и исходного нетермообработанного сплава.

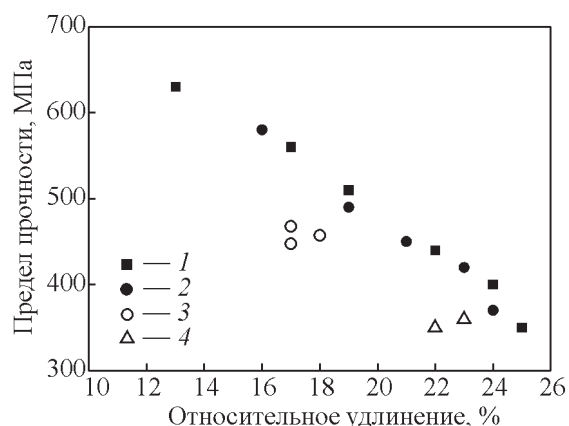


Рис. 6. Механические свойства сплава Д16 после различных режимов обработки в координатах прочность – пластичность: 1 — газовая экструзия в диапазоне давлений 200 – 220 МПа; 2 — диапазон давлений 400 – 420 МПа; 3 — исходный сплав термообработанный, 4 — исходный сплав нетермообработанный.

Fig. 6. Mechanical properties of D16 type alloy after various processing modes in the strength-ductility coordinates: 1 — gas extrusion in the pressure range 200 – 220 MPa; 2 — pressure range 400 – 420 MPa; 3 — heat-treated initial alloy; 4 — non-heat-treated initial alloy.

Данные так же представлены на рис. 5 и 6, где можно сравнить механические свойства сплава Д-16, обработанного газовой экструзией по различным режимам со свойствами исходного термообработанного и нетермообработанного сплавов.

Можно отметить, что область газовой экструдированного сплава смещена относительно исходного в сторону большей прочности и пластичности одновременно. С повышением температуры и скорости экструзии прочность сплава повышается, а пластичность снижается. Это можно объяснить тем, что с повышением температуры и скорости экструзии условия закалки (исходная температура и скорость охлаждения) приближаются к стандартным. При максимальной температуре экструзии 480 °С близкой к стандартной, достигнута прочность, превышающая достигаемую на этом сплаве при стандартной упрочняющей обработке.

### Выводы

1. Используя технологию газовой экструзии с локальным нагревом, проведена обработка термически упрочняемых сплавов (конструкционной стали 50ХФА, титанового сплава ВТ-14 и алюминиевого сплава Д-16) в режиме деформации.

ционно-термического упрочнения с степенью пластической деформации 90 % и выше, с получением проволочных изделий.

2. Проведено сравнение механических свойств проволочных образцов сплавов, обработанных газовой экструзией при различных сочетаниях параметров давления газа, температуры деформации, скорости экструзии и с исходными недеформированными образцами этих сплавов термообработанными и нетермообработанными.

3. На всех обработанных сплавах есть сочетания параметров обработки, при которых механические свойства превышали исходные как по прочности, так и по пластичности.

### Литература

1. Бернштейн М.Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов. Москва, Металлургия, 1968, в 2-х т., 1170 с.
2. Новиков П.П., Полькин П.С., Барсуков А.Д. Высокотемпературная термомеханическая обработка титанового сплава VT-15. *Металловедение лёгких сплавов*. М.: Наука, 1965, с. 145 – 150.
3. Каганович И.Н., Ефимова М.В. Режимы деформирования и температура закалки прутков сплава VT-14. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 1969, № 5, с. 7 – 10.
4. Верещагин Л.Ф. Избранные труды “Синтетические алмазы и гидроэкструзия”. М.: Наука, 1982, с. 271 – 281.
5. Верещагин Л.Ф., Коняев Ю.С., Поляков Е.В., Гуревич Я.Б., Дмитриев В.Н., Высокотемпературная газовая экструзия металлов. *ФХОМ*, 1972, № 4, с. 85 – 91.
6. Бербенцев В.Д., Коняев, Ю.С. Высокотемпературная газовая экструзия с локальным нагревом. *Кузнечно-штамповое производство*, 1980, № 10, с. 10-12.
7. Бербенцев В.Д. Скоростная устойчивость процесса горячей газовой экструзии. *Технология металлов*, 2006, № 5, с. 13 – 17.

### References

1. Bernshtein M.L. *Termomechanicheskaya obrabotka metallov i splavov* [Termomechanical treatment of metals and alloys]. Moscow, Metallurgia Publ., 1968, in 2 vols., 1170 p.
2. Novikov P.P., Polkin P.S., Barsukov A.D. *Vysokotemperaturnaya termomechanicheskaya obrabotka titanovogo splava VT-15, sbornik metallovedeniye logkih splavov* [High-temperature thermomechanical treatment of titanium alloy VT-15. Collection of Metal science of light alloys]. Moscow, Nauka Publ., 1965, pp. 145 – 150.
3. Kaganovich I.N., Efimova M.V., Rezhimi deformirovaniya i temperatura zakalki prutkov splava VT-14 [Deformation modes and quenching temperature of W-14 alloy bars]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov — Metal science and heat treatment*, 1969, no. 5, pp. 7 – 10.
4. Vereschagin L.F. Izbrannie trudi “Sinteticheskie almazi i gidroekstruzia” [Selected Works “Synthetic Diamonds and Hydroextrusion”]. Izdatelstvo “Nauka”, Moskva 1982, pp. 271 – 281
5. Vereschagin L.F., Konyaev U.S., Polyakov E.V., Gurevich Ya.B., Dmitriev V.N. *Vysokotemperaturnaya gazovaya ekstruziya metallov* [High-temperature gas extrusion of metals]. *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov — Physics and Chemistry of Materials Treatment* (in Russ), 1972, no. 4, pp. 85 – 91.
6. Berbentsev V.D., Konyaev U.S., *Visokotemperaturnaya gazovaya ekstruziya s lokalnim nagrevom* [High-temperature gas extrusion with local heating]. *Kuznechno-shtampovochnoye proizvodstvo — Obrabotka materialov davleniyem Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure*, 1980, no. 10, pp. 10 – 12.
7. Berbentsev V.D. *Skorostnaya ustoichivost protsessa goryachey gazovoi ekstruzii* [High-speed stability of the hot gas extrusion process]. *Tekhnologiya metallov — Russian Metallurgy (Metally)*, 2006, no. 5, pp. 13 – 17.

Статья поступила в редакцию — 16.12.2020 г.  
после доработки — 11.01.2021 г.  
принята к публикации — 12.01.2021 г.

**Бербенцев Владимир Демьянович** — Институт физики высоких давлений им. Л. Ф. Верещагина РАН (142190, Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, стр. 14) ведущий инженер-технолог, специалист в области обработки металлов давлением. E-mail: [berbentsevv@mail.ru](mailto:berbentsevv@mail.ru).



## Gas extrusion treatment of thermally hardened steel and alloys in the mode of deformation-thermal hardening

V. D. Berbentsev

Thermally hardened alloys based on iron (50 Cr – V – N type steel), titanium (VT-14), and aluminum (D16) were subjected to deformation by gas extrusion with local heating in the mode of deformation-thermal hardening with high degrees of deformation 90 % or more to obtain a thin wire at the output. Gas extrusion was performed at various combinations of processing parameters — gas pressure, deformation temperature, extrusion speed. The wire deformed under various combinations of processing parameters was cooled in air, subjected to tempering or aging and a tear test. The mechanical properties obtained as a result of the tests were compared with the data on the mechanical properties of the initial, undeformed alloys, heat-treated and non-heat-treated. On all gas-extruded alloys, the mechanical properties exceeded the initial ones both in strength and plasticity. The combination of gas extrusion parameters (gas pressure, deformation temperature, extrusion speed) has a decisive influence on the combination of strength and ductility of alloys treated by gas extrusion.

**Keywords:** gas extrusion, deformation, pressure, temperature, speed, strength, ductility, alloys, processing, wire, quenching, tempering, aging.

---

*Berbentsev Vladimir — L.F. Vereshchagin Institute of High Pressure Physics of the RAS (142190, Moscow, Troitsk, Kaluzhskoe Shosse, 14), leading process engineer, specialist in the field of metal pressure processing. E-mail: [berbentsevv@mail.ru](mailto:berbentsevv@mail.ru).*