

УДК 621.941, 621.73; 620.18

Ковка как способ улучшения качества и обработки резанием заготовок из специальных сталей

П.А. Головкин

АО «Плутон»

Forging as a way to improve the quality and turning of specialty steels

P. A. Golovkin

Pluton JSC

На примере сталей 07X16N6-III, 12X18N10T-ВД, а также 30ХГСА и 50ХФА, аналогов сталей AISI 301, AISI 321, UNSG 41500 (США) и 14331 (Чехия) исследовано влияние ковки на структуру материала и обработку резанием полученных заготовок по сравнению с таковым при проточке обычного горячекатаного прутка. Показано, что применение ковочных операций может существенно улучшить качество поверхности проточенных заготовок и снизить нагрузку на режущий инструмент. Результат достигается благодаря получению более равномерной структуры материала поковок относительно исходных прутков и меньшему разбросу твердости материала по сечению заготовки. Приведены рекомендуемые режимы ковки и термической обработки заготовок перед токарной обработкой. Выявлены зависимости между металлографической структурой материала заготовки, его твердостью и характеристиками при токарной обработке.

EDN: PBGLDZ, <https://elibrary/pbgldz>**Ключевые слова:** специальные стали, скорость деформации, торец прутка, структура материала, качество поверхности, нагрузка на резец

The paper uses the examples of 07Kh16N6-Sh, 12Kh18N10T-VD, as well as 30KhGSA and 50KhFA steels, analogs of the AISI 301, AISI 321, UNSG 41500 (USA) and 14331 (Czech Republic) steels to study the forging effect on the material structure and cutting of the resulting workpieces in comparison with turning a conventional hot-rolled rod. It shows that forging introduction is able to significantly improve surface quality of the turned workpieces and reduce the tool loading. The result is achieved by obtaining a more uniform structure of the forging material relative to the original rods, as well as by smaller spread of the material hardness over the workpiece cross-section. The paper provides recommended forging modes and heat treatment of workpieces before turning. It identifies relationships between the workpiece material metallographic structure, its hardness and characteristics in the turning.

EDN: PBGLDZ, <https://elibrary/pbgldz>**Keywords:** special steels, deformation rate, rod end, material structure, surface quality, cutter loading

К металлическим материалам, в том числе к сталям, часто предъявляются специальные требования, включая технологические, без кото-

рых трудно получить заданные целевые свойства изделия. В то же время отсутствуют нормативные документы, определяющие целесооб-

разные режимы изготовления деталей на этапах от горячей пластической деформации исходного материала до изготовления механически обработанной детали в части получения ее качественной поверхности и структуры. То есть не отслеживается сквозное влияние технологических воздействий на материал через один переход и более, что усложняет достижение заданных свойств деталей и конечного изделия.

В связи с этим интересно выявить зависимость между дополнительной деформационной обработкой исходных прутковых заготовок, получаемой структурой, нагрузкой на резец при токарной обработке и качеством поверхности деталей после нее.

Следует отметить, что состояние поверхности деталей, которое нельзя в полной мере описать параметром ее шероховатости, во многом определяется структурным и фазовым состояниями их материала, оказывает непосредственное влияние, например, на процесс нанесения покрытий. Поэтому настоящая статья не претендует на исчерпывающую полноту.

Процессковки как способ воздействия на исходный материал выбран исходя из его относительной простоты, дешевизны и использования универсального оборудования. Исследования проведены на примере жаропрочной стали переходного класса 07X16H6-III (ЭП288-III, СН-2А [1, 2]), жаропрочной аустенитной стали 12X18H10T-ВД [2], улучшаемой стали 30ХГСА [3] и пружинной стали 50ХФА [3].

Известным недостатком пруткового проката перечисленных сталей являются пониженные прочностные и пластические характеристики в поперечном направлении [1–3].

Цель работы — выявление возможности улучшения токарной обработки материала путем проковки исходных прутковых заготовок с различных температур и по разным схемам.

Материал и методика эксперимента. Исследования включали в себя ковку исходных прутковых заготовок $\varnothing 70 \times 165$ мм в размер $\varnothing 80 \times 120$ мм, стабилизирующую термическую обработку поковок, динамометрические и металлографические исследования и измерение твердости и шероховатости обработанной поверхности образцов. Размер прутковой заготовки назначали с учетом выгорания материала заготовок.

После предварительной механической обработки размеры образцов составляли $\varnothing 70 \times 110$ мм, шероховатость их поверхности — не менее $Ra = 3,2$ мкм (ГОСТ 2789–73) [4]. Схемыковки соответствовали рекомендованным ПИ 1.2.085-78 [5]. Значения температуры нагрева образцов перед ковкой и номера ее схем приведены в табл. 1.

Следует отметить, что название производственной инструкции ПИ 1.2.085-78 «Ковка и штамповка деформируемых алюминиевых сплавов» не должно удивлять, так как многолетняя производственная практика показала хорошую применимость указанных в этом документе ковочных схем, в том числе для различных сталей, и термины «схема номер 1», «схема номер 2» и «схема номер 3» стали среди специалистов по ковке широко используемыми.

Для образцов № 1–3 температуруковки назначали в соответствии с рекомендациями [1–3], для образцов № 4–6 — с указанными в табл. 1, более низкими, чтобы отследить влияниековки при пониженной температуре на структуру и обрабатываемость материала заготовок.

Например, технологический процессковки образца № 6 включал в себя следующие операции: нагрев до 1050 ± 10 °С в газовой печи, осадку на пневматическом ковочном молоте МА4134 с массой падающих частей 250 кг

Таблица 1

Значения температуры нагрева образцов перед ковкой

Марка стали	Температура нагрева перед ковкой, °С, образцов					
	1	2	3	4	5	6
	Номер схемыковки по ПИ 1.2.085-78					
	1	2	3	1	2	3
07X16H6-III	1160	1160	1160	1050	1050	1050
12X18H10T-ВД	1180	1180	1180	1050	1050	1050
30ХГСА	1180	1180	1180	1050	1050	1050
50ХФА	1100	1100	1100	1000	1000	1000

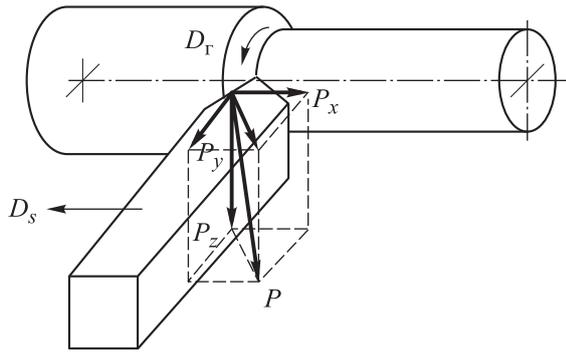


Рис. 1. Схема распределения нагрузок при токарной обработке образца:

D_r — главное движение вращения;

D_s — движение подачи;

P, P_x, P_y, P_z — сила резания и ее составляющие по осям X, Y, Z соответственно

до 60 мм, протяжку поперек волокна, осадку до 60 мм, подогрев до исходной температуры, протяжку поперек волокна и осадку до 60 мм, протяжку поперек волокна и обкатку в размер поковки.

Все поковки подвергали различной механической обработке для снятия напряжений и излишнего наклепа с целью обеспечения нормальной токарной обработки в исходный для проточки размер $\varnothing 70 \times 110$ мм. Токарную обработку образца проводили на станке 16К20 стандартными прямыми проходными резцами при частоте вращения шпинделя 200 мин^{-1} , подаче на оборот $S_o = 0,1 \text{ мм/об}$ и толщине снимаемого слоя 1 мм [6]. Проточку образца делали как по образующей, так и по торцу. При торцевом точении резец подавали по направлению от наружной поверхности к оси симметрии образца.

Поковки из стали 07Х16Н6-Ш для снятия напряжений обрабатывали по заводским режимам путем отжига при температуре $780 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 6 ч с охлаждением на воздухе до $20 \text{ }^\circ\text{C}$ и последующим отпуском при $680 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 4 ч с повторным окончательным охлаждением на воздухе до $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Поковки из стали 12Х18Н10Т-ВД для снятия напряжений проходили закалку в воде с нагрева до температуры $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ согласно рекомендациям [3].

Поковки из стали 30ХГСА подвергали неполному отжигу по заводскому режиму при температуре $780 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 1 ч и охлаждению на воздухе до $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Поковки из стали 50ХФА проходили нормализацию при температуре $650 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 1 ч, затем при температуре $810 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ с выдержкой 2 ч, охлаждаясь с печью до $200 \text{ }^\circ\text{C}$ и далее на шамотном полу до уровня твердости $\leq 230 \text{ НВ}$ [2].

Анализ металлографии и измерение твердости материала образцов проводили в контрольных точках, расположенных по направлению от приповерхностной части к центру сечения образца. Нагрузки на резец измеряли с помощью цифрового динамометра в соответствии с приведенной на рис. 1 схемой, где координаты X, Y и Z соответствуют подаче, радиальной силе и силе резания при токарной обработке детали [7].

Шероховатость обработанной поверхности измеряли профилометром на образующей образцов.

Результаты и их обсуждение. Получены графики нагрузок на режущий инструмент (резец)

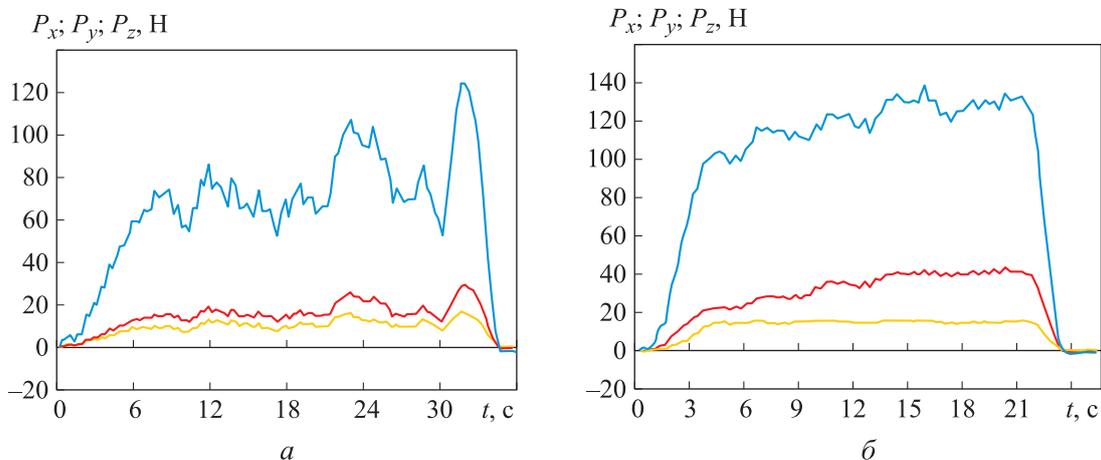


Рис. 2. Зависимости составляющих силы резания P_x (—), P_y (—) и P_z (—) от времени t при точении торца прутка (а) и поковки № 6 (б)

по координатам X , Y и Z , соответствующих подаче, радиальной силе и силе резания [6, 7], при проточке по образующей и торцу образцов. Картины распределения нагрузок при токарной обработке заготовок на примере стали 30ХГСА, подробно рассмотренные в работе [8], приведены на рис. 2.

Из рис. 2 следует, что величина и характер нагрузок на резец при точении по образующей материала показывают его меньшую плотность относительно материала, претерпевшего большую деформацию поковок. Кроме того, характер распределения нагрузок на резец при торцевой проточке прутка свидетельствует о разрыве скоростей деформации [9] в его материале при прокатке, когда эффект опережения перемещения материала заготовки относительно окружной скорости валков вызывает в материале растягивающие напряжения, как это описано в работе [10].

Для дополнительного пояснения влияния эффекта опережения при прокатке и вызванного им разрыва скоростей деформации материала заготовки на уровень образующихся в ней напряжений, на рис. 3 показан внешний вид отрезанного от конца горячекатаного прутка куска материала. Вызванные прокаткой напряжения в нем были так велики, что привели к отрыву внутренней части материала от внешней части прутка, и образовавшего так называемую рубашку.

Сравнение внешнего вида указанного образца с колебаниями графика нагрузки на резец при торцевой обработке горячекатаного прутка показывает совпадение мест наибольших напряжений в поперечном сечении прутка, и скачков нагрузки на резец. Также сопоставление графиков нагрузок на резец при торцевке прутка и поковки № 6 показывает, что в последнем случае нагрузка на резец хотя и несколько больше в абсолютном значении, но имеет намного меньшее колебание ввиду более однородной структуры прокованного металлического материала.

Приведенные на рис. 4 микроструктуры материала и фактуры обработанной поверхности образцов из стали 07Х16Н6-Ш также позволяют оценить влияние наследуемых исходными заготовками напряжений на обрабатываемость металлического материала. Видно, что материал прутков отличается выраженной неравномерностью, крупным зерном и наличием микроразрывов у тройных стыков зерен, что также



Рис. 3. Внешний вид разрушения концевой части прутка вследствие разрыва скоростей деформации его материала при прокатке

связано с явлением опережения при прокатке [10] и образующимися в материале прутков напряжениями.

Как следствие, фактура обработанной поверхности прутка изобилует вырывами и задирками металлического материала, на торце поковки № 6 таких дефектов намного меньше.

Распределение нагружающих инструмент сил в целом соответствует их классическому соотношению, согласно которому сила резания P_x составляет от 1/8 до 1/4 силы резания P_z , а сила P_y — от 1/4 до 1/2 силы резания P_z [7].

Ковочные операции уплотняют материал заготовок и измельчают его зерно, в результате чего твердость материала растет с увеличением его укова и уменьшением температуры деформации. Таким образом, проведениековки при пониженных относительно рекомендованных источниками [1–3] температур является предпочтительной. Это влияет и на значения нагрузок на резец при токарной обработке заготовок, что особенно заметно при их торцевом точении, как это следует из сопоставления данных табл. 1 и 2.

Характерно, что наибольший уровень нагрузок наблюдается у исходного прутка и поковок, полученных по схемековки № 1, использование которой дает меньший уков материала, чем схемы № 2 и 3, т. е. его меньшую деформационную проработку и совершенствование относительно материала прутка. Это связано с тем, что пониженная плотность срединных слоев заготовок вызывает налипание материала на инструмент и рост уровня нагрузок на резец, что также отражено в табл. 2. Здесь и далее образец № 0 соответствует исходному прутку.

Соответственно, неравномерное распределение напряжений и присутствующих в материале избыточных фаз и изъянов в виде мик-

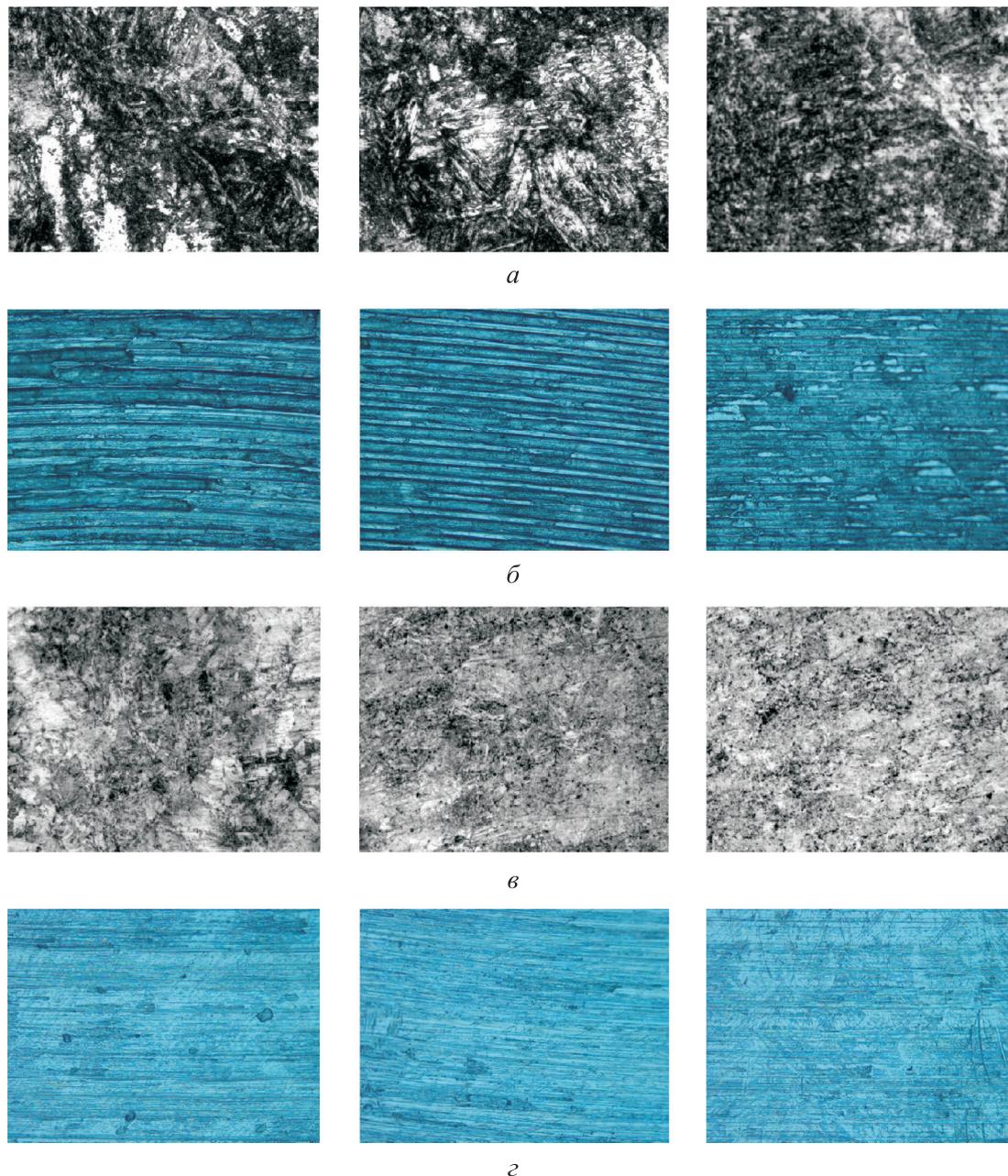


Рис. 4. Микроструктура с увеличением $\times 200$ (а, в) и рельеф с увеличением $\times 100$ (б, г) в контрольных точках обработанной поверхности торца прутка (а, б) и поковки № 6 (в, г) из стали 07X16N6-III

ропустот у тройных стыков зерен ухудшает качество обработки. Более подробно распределение нагрузок при точении прутков и поволок из сталей 07X16N6-III и 30XГСА рассмотрено в работах [7, 10].

Содержание дефектов в материале повышается к центру сечения образцов, что обусловлено явлением опережения при прокатке прутков. Ковочные операции уплотняют металлический материал, что отражается на его структуре, как это видно на рис. 4 для стали 07X16N6-III, и на

рис. 5 для сталей 12X18N10Т-ВД 30XГСА и 50XФА.

Положительное влияниековки на обрабатываемость материала хорошо показывает сопоставление поверхностей, полученных при торцевом точении прутка и поковки из стали 30XГСА (рис. 6). Это также объясняется меньшим разбросом его твердости и уплотненным материалом, в котором последствия явления опережения при прокатке уже устранены. Как следствие обработки более равно-

мерного по структуре и свойствам материала подтверждают и значения нагрузок на резец, приведенные в табл. 2, а сходящая стружка становится менее ломкой и дефектной, как описано в работах [8, 11].

Наилучшие по качеству поверхности результаты для всех исследованных сталей дает использование ковочной схемы № 3 [4] с нагрева до меньших относительно рекомендованных источниками [1–3] температур, которым соот-

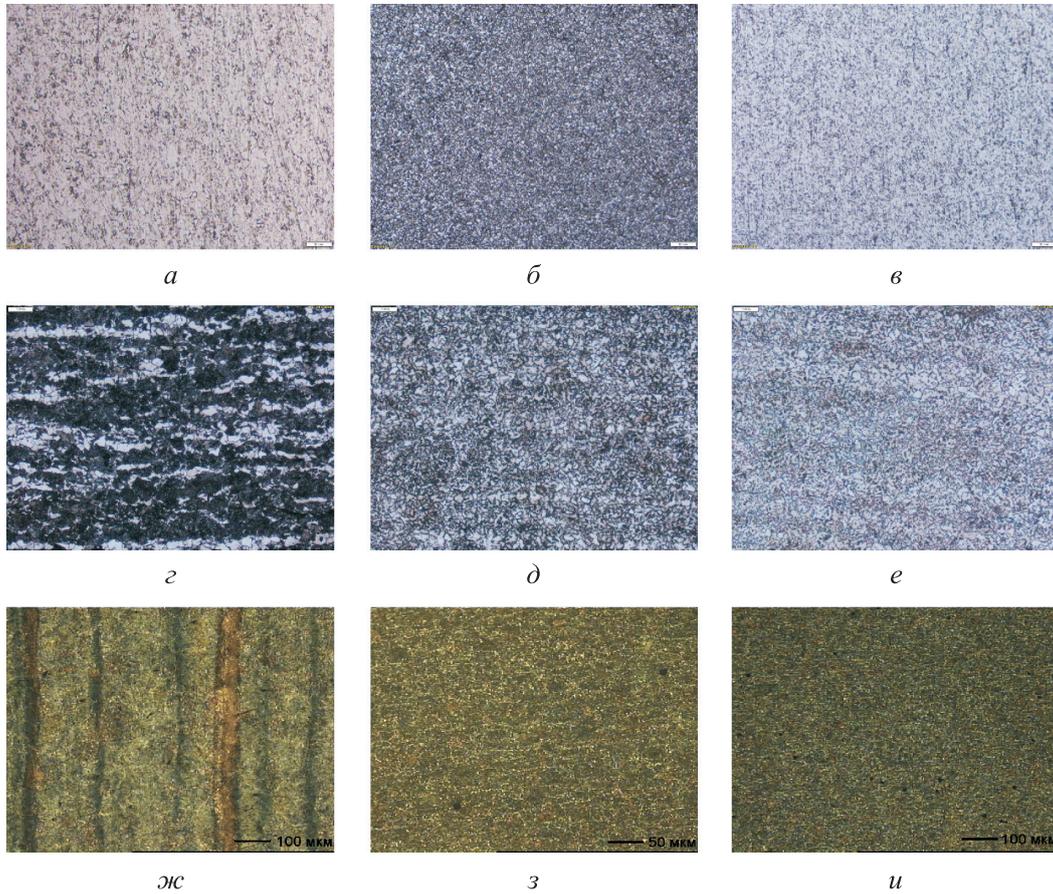


Рис. 5. Микроструктура обработанной поверхности прутка (*а, г, ж*) и поковки № 3 (*б, д, з*) и № 6 (*в, е, и*) из сталей 12Х18Н10Т-ВД (*а-в*), 30ХГСА (*г-е*) и 50ХФА (*ж-и*) при увеличении $\times 100$

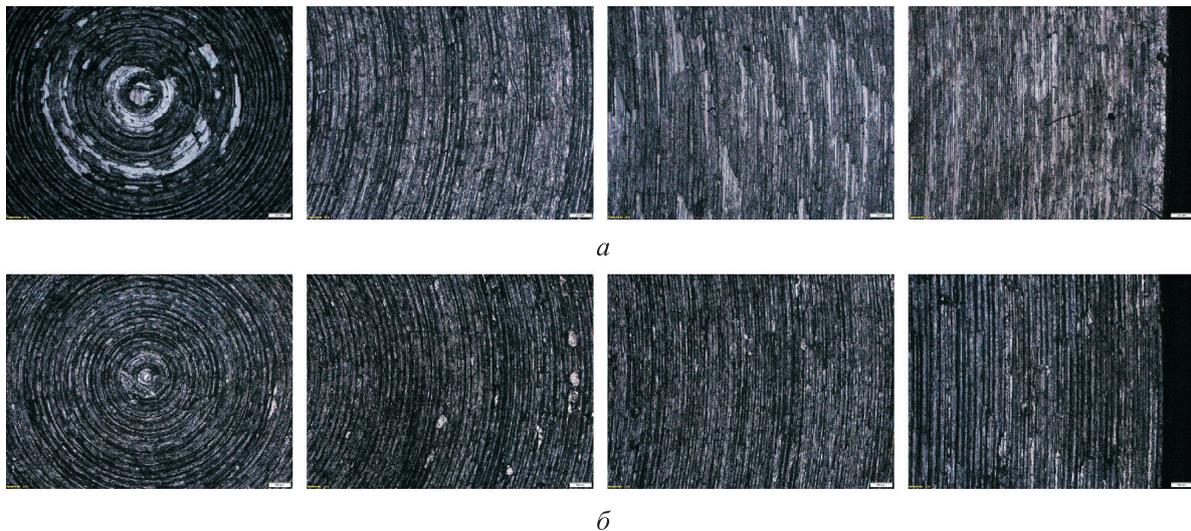


Рис. 6. Фактура обработанной поверхности торца прутка (*а*) и поковки № 6 (*б*) из стали 30ХГСА при увеличении $\times 50$

ветствуют образцы № 3 и 6 (табл. 3). В то же время следует отметить, что стандартная методика определения шероховатости по ГОСТ 2789–73 не дает возможности в полной мере оценить действительное качество поверхности.

Такое расхождение хорошо видно при сопоставлении микроструктур обработанных

поверхностей (см. рис. 3–5) и данных, приведенных в табл. 3, где значения шероховатости Ra различаются незначительно, а фактуры исходных горячекатаных прутков и кованных образцов при разной температуре поковки существенно отличаются друг от друга. Это также указывает на необходимость проковки загото-

Таблица 2

Значения нагрузок на резец при проточке по образующей и торцу образцов

Марка стали	Номер образца	Нагрузки на резец при точении образца, Н					
		по образующей			по торцу		
		P_x	P_y	P_z	P_x	P_y	P_z
07X16H6-III ¹	0	24 ± 1	10 ± 1	40 ± 4	80...120	14...32	140...360
	3	36 ± 2	23 ± 2	70 ± 5	120 ± 02	60...90	210...240
	6	38 ± 1	30 ± 1	70 ± 5	80...90	40...58	160...180
12X18H10T-ВД ²	0	21 ± 1	10 ± 1	36 ± 2	40...55	22 ± 2	65...90
	3	32 ± 2	22 ± 1	65...70	74...80	22 ± 1	53...62
	6	26 ± 1	28 ± 1	68...70	78...82	22 ± 1	55...63
30XГСА ¹	0	18...22	10...17	60...120	20...40	17 ± 1	100...130
	3	26...34	15...17	100...110	28...39	17 ± 1	120...135
	6	40 ± 1	17 ± 1	127 ± 2	40 ± 1	17 ± 1	125 ± 3
50ХФА ¹	0	21 ± 1	12...18	65...110	22...40	18 ± 2	85...110
	3	26...37	14...19	110 ± 5	29...39	19 ± 2	97...115
	6	40...43	17...20	133 ± 5	24 ± 2	19 ± 2	100...115

¹ Съем при торцевой проточке 20 мм.
² Съем при торцевой проточке 10 мм.

Таблица 3

Значения твердости материала и шероховатости обработанной поверхности образцов

Марка стали	Номер образца	Размер зерна/твердость, мкм/НВ			Шероховатость Ra , мкм	
		в центре	на середине радиуса	на краю	по образующей	по торцу
07X16H6-III	0	100/341	125/341	150/302	0,72	3,80
	3	20/375	25/388	30/388	0,54	3,71
	6	15/388	20/388	25/433	0,46	3,67
30XГСА	0	10/160	15/158	20/156	0,84	4,21
	3	5/184	7/182	10/184	0,62	3,84
	6	3/185	5/182	7/183	0,54	3,78
12X18H10T-ВД	0	20/134	25/132	30/128	0,68	3,72
	3	7/138	10/136	15/136	0,52	3,65
	3	5/139	7/137	10/139	0,46	3,62
50ХФА	0	50/228	70/223	100/219	0,86	3,86
	3	5/232	7/227	10/223	0,62	3,58
	6	3/236	5/230	7/238	0,56	3,60

вок перед их точной механической обработкой, которая помимо улучшения обрабатываемости повышает срок службы готовых деталей, как это показано в работе [12] для стали 50ХФА.

Выводы

1. Характеристики структуры и обрабатываемости исходных стальных прутков не могут в полной мере соответствовать требованиям к материалам, предназначенным для изготовления точных деталей. Существенный разброс размера зерна, высокая микрохимическая неоднородность ввиду направленной строчечной структуры и высокий уровень сохраняемых внутренних напряжений затрудняют получение качественной поверхности детали после токарной обработки.

2. Применение операций сложнойковки существенно повышает однородность структуры и

свойства материала заготовок через измельчение зерна и получение малонаправленной структуры с малым разбросом по твердости, а также снижает микрохимическую неоднородность металлического материала относительно материала исходных горячекатаных прутков, что проявляется в его металлографических шлифах.

3. Ковка при пониженных относительно рекомендованных для специальных сталей температурах существенно улучшает обрабатываемость заготовок, вследствие чего снижается разброс нагрузок на режущий инструмент и достигается лучшее качество поверхности обработанных деталей при отходящей мелко-дробной стружке, близкой к сливной.

4. Даже при формально близких показателях шероховатости дополнительно деформированный путем сложнойковки металлический материал имеет более совершенную фактуру обработанной поверхности, чем материал обычного горячекатаного прутка.

Литература

- [1] ПИ 1.2.038-77. Применение и термическая обработка стали 07X16H6 (ЭП288, СН-2А). Москва, ВИАМ, 1978. 11 с.
- [2] Туманов А.Т., ред. *Авиационные материалы*. Т. 2. *Коррозионностойкие и жаростойкие стали и сплавы*. Москва, ОНТИ. 1975. 372 с.
- [3] Туманов А.Т., ред. *Авиационные материалы*. Т. 3. *Конструкционные стали*. Москва, ОНТИ. 1975. 430 с.
- [4] ГОСТ 2789-73. *Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики*. Москва, ФГУП Стандартиформ. 2006. 6 с.
- [5] ПИ 1.2.085-78. *Ковка и штамповка деформируемых алюминиевых сплавов*. Москва, ВИАМ. 1978. 17 с.
- [6] ГОСТ 18878-73. *Резцы токарные проходные прямые с пластинами из твердого сплава. Конструкция и размеры*. Москва, Изд-во стандартов. 2017. 15 с.
- [7] Кудинов В.А. *Динамика станков*. Москва, Машиностроение. 1967. 359 с.
- [8] Головкин П.А., Крюков А.В. Влияние предварительной деформации на структуру материала и качество поверхности при точении стали 30ХГСА. *Технология машиностроения*, 2022, № 10, с. 19–26.
- [9] Дзугутов М.Я. *Напряжения и разрывы при обработке металлов давлением*. Москва, Металлургия. 1974. 280 с.
- [10] Зюзин В.И., Третьяков А.В., ред. *Теория прокатки*. Москва, Металлургия. 1982. 335 с.
- [11] Головкин П.А., Крюков А.В. Влияние предварительной деформации на качество поверхности при чистовом точении стали 07X16H6-Ш. *Технология машиностроения*, 2023, № 10, с. 32–39.
- [12] Головкин П.А. Повышение качества валов-торсионов стартер-генераторов с применением ковочных операций. *Сборка в машиностроении, приборостроении*, 2022, т. 23, № 6, с. 280–284.

References

- [1] PI 1.2.038-77. *Primenenie i termicheskaya obrabotka stali 07Kh16N6 (EP288, SN-2A)* [Production Instruction PI 1.2.038-77. Application and heat treatment of 07X16H6 steel (EP288, CH-2A)]. Moscow, VIAM Publ., 1978. 11 p. (In Russ.).

- [2] Tumanov A.T., ed. *Aviatsionnye materialy*. T. 2. *Korrozionnostoykie i zharostoykie stali i splavy* [Aviation materials. Vol. 2. Corrosion-resistant and heat-resistant steels and alloys]. Moscow, ONTI Publ., 1975. 372 p. (In Russ.).
- [3] Tumanov A.T., ed. *Aviatsionnye materialy*. T. 3. *Konstruksionnye stali* [Aviation materials. T. 3. Structural steels]. Moscow, ONTI Publ., 1975. 430 p. (In Russ.).
- [4] GOST 2789–73. *Sherokhovatost poverkhnosti. Parametry i kharakteristiki* [State standard GOST 2789–73. Surface roughness. Parameters and characteristics]. Moscow, FGUP Standartinform Publ., 2006. 6 p. (In Russ.).
- [5] PI 1.2.085–78. *Kovka i shtampovka deformiruemykh alyuminievyykh splavov* [Production Instruction PI 1.2.085–78. Forging and stamping of deformable aluminium alloys.]. Moscow, VIAM Publ., 1978. 17 p. (In Russ.).
- [6] GOST 18878–73. *Reztsy tokarnye prokhodnye pryamye s plastinami iz tverdogo splava. Konstruktsiya i razmery* [State standard GOST 18878–73. Carbide-tipped straight bull-nose turning tools. Design and dimensions]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 2017. 15 p. (In Russ.).
- [7] Kudinov V.A. *Dinamika stankov* [Dynamics of machine tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1967. 359 p. (In Russ.).
- [8] Golovkin P.A., Kryukov A.V. The effect of pre-deformation on the structure of the material and the quality of the surface when turning steel 30KhGSA. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2022, no. 10, pp. 19–26. (In Russ.).
- [9] Dzugutov M.Ya. *Napryazheniya i razryvy pri obrabotke metallov davleniem* [Stresses and discontinuities in metal processing by pressure treatment of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1974. 280 p. (In Russ.).
- [10] Zyuzin V.I., Tretyakov A.V., eds. *Teoriya prokatki* [Theory of rolling]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1982. 335 p. (In Russ.).
- [11] Golovkin P.A., Kryukov A.V. Influence of pre-deformation on surface quality during finishing turning of 07X16H6- steel. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2023, no. 10, pp. 32–39. (In Russ.).
- [12] Golovkin P.A. Improvement of quality of the torsion shafts of starter-generators using the forging operations. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii* [Assembling in Mechanical Engineering, Instrument-Making], 2022, vol. 23, no. 6, pp. 280–284. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 20.01.2024

Информация об авторе

ГОЛОВКИН Павел Александрович — кандидат технических наук, начальник лаборатории входного контроля материалов. АО «Плутон» (105120, Москва Российская Федерация, ул. Нижняя Сыромятническая, д. 11, e-mail: p.golovkin@pluton.msk.ru).

Information about the author

GOLOVKIN Pavel Aleksandrovich — Candidate of Science (Eng.), Head of Materials Input Control Laboratory. JSC “Pluton” (105120, Moscow, Russian Federation, Nizhnyaya Syromyatnicheskaya St., Bldg. 11, e-mail: p.golovkin@pluton.msk.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Головкин П.А. Ковка как способ улучшения качества и обработки резанием заготовок из специальных сталей. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 9, с. 82–90.

Please cite this article in English as:

Golovkin P.A. Forging as a way to improve the quality and turning of specialty steels. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 9, pp. 82–90.