

**КОВКА КАК СПОСОБ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА И ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ
ЗАГОТОВОК ИЗ СПЕЦИАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ**

Головкин П.А., к.т.н.

АО «Плутон», 105120, Россия, г. Москва, ул. Нижняя Сыромятническая, д.11.

p.golovkin@pluton.msk.ru; тел.: (495) 730-36-19

**FORGING AS A WAY TO IMPROVE THE QUALITY AND CUTTING OF
WORKPIECES MADE OF SPECIAL STEELS**

P.A. Golovkin, Ph.D. in Engineering Science

Pluton JSC, 105120, Russia, Moscow, Nizhnyaya Syromyatnicheskaya st.

p.golovkin@pluton.msk.ru; tel: (495) 730-36-19

Аннотация

На примере российских сталей 07X16H6-III, 12X18H10T-ВД, а также 30ХГСА и 50ХФА, аналогов сталей AISI 301, AISI 321, UNSG 41500 (США) и 14331 (Чехия), изучается влияниековки на структуру материала и обработку резанием полученных из них заготовок по сравнению с проточкой обычного горячекатаного катаного прутка. Показано, что применение ковочных операций может существенно улучшить качество поверхности проточенных заготовок и снизить нагрузку на применяемый инструмент.

Результат достигается за счёт получения более равномерной структуры материала кованых заготовок относительно горячекатаных прутков, а также меньшего разброса твёрдости обрабатываемого материала по сечению заготовки, и понижения уровня исходных напряжений в нём. Приведены рекомендуемые режимыковки и термической обработки заготовок перед токарной обработкой.

Путём сравнения показателей нагрузки на резец, твердости и металлографической структуры материала, а также шероховатости получаемых обработанных поверхностей, показана эффективность, универсальность и простота предлагаемых технологических решений. Для каждой указанной стали описаны выявленные зависимости между металлографической структурой материала заготовки, его твёрдостью и характеристиками при токарной обработке.

Ключевые слова: сталь, деформация, пруток, поковки, детали, температура, структура материала, твёрдость, обрабатываемость, качество поверхности, нагрузка на режущий инструмент.

Annotation

On the example of steels AISI 301, AISI 321, UNSG 41500 (USA) and 14331 (Czech Republic), the influence of forging on the material structure and machining of billets obtained from them in comparison with the turning of conventional hot-rolled rolled bar is studied. It is shown that the use of forging operations can significantly improve the surface quality of turned billets and reduce the load on the used tools.

The result is achieved by obtaining a more uniform material structure of forged billets relative to hot-rolled bars, as well as less variation of hardness of the processed material across the cross-section of the billet, and lowering the level of initial stresses in it. Recommended modes of forging and heat treatment of billets before turning are given.

By comparing the indicators of load on the cutter, hardness and metallographic structure of the material, as well as the roughness of the machined surfaces, the effectiveness, versatility and simplicity of the proposed technological solutions are shown. For each specified steel, the revealed dependencies between the metallographic structure of the workpiece material, its hardness and turning characteristics are described.

Keywords: steel, deformation, rod, forgings, critical parts, temperature, material structure, hardness, machinability, surface quality, load on the cutting tool.

Общие положения

Особенностью изделий новой техники является применение широкого круга металлических материалов, в том числе сталей, к деталям из которых предъявляется ряд специальных требований, включая технологические, без которых трудно получить их заданные целевые свойства. В то же время, отсутствуют нормативные документы, которые определяли бы целесообразные технологические режимы изготовления деталей на этапе от горячей пластической деформации исходного материала, до получения механически обработанной детали в части получения её качественной поверхности и структуры. То есть, не отслеживается сквозное влияние технологических воздействий на материал, через один и более переход, и это усложняет достижение заданных свойств получаемых деталей и конечного изделия, в целом, удорожает его изготовление.

На основании производственного опыта принято решение выявить зависимость между параметрамиковки, структурой, а также стабильностью процесса обработки резанием, нагрузкой на инструмент, и качеством поверхности и структуры материала чистовых деталей.

Следует отметить, что состояние поверхности деталей не может быть в полной мере описано параметром её шероховатости, и во многом определяется структурным и фазовым состоянием их материала, в то же время оказывая непосредственное влияние, например, на процесс нанесения покрытий. Поэтому настоящая статья не претендует на исчерпывающую полноту изучения описываемых явлений.

Процессковки как способ воздействия на исходный металлический материал был выбран исходя из его относительной простоты и дешевизны, использовании универсального оборудования. Исследования проводились на примере жаропрочной стали переходного класса 07X16H6-III (ЭП288-III, СН-2А [1, 2]), жаропрочной аустенитной стали 12X18H10T-ВД [2], конструкционной улучшаемой стали 30ХГСА [3] и пружинной стали 50ХФА [3]. Необходимо отметить, что известным недостатком пруткового проката перечисленных сталей являются пониженные прочностные и пластические характеристики в поперечном направлении [1...3]. Предложенные технологические решения призваны обеспечить сбалансированное улучшение свойств материала заготовок и улучшить качество поверхности получаемых деталей после их токарной обработки.

Материал и методика эксперимента

Проведённые исследования включали ковку исходных прутковых заготовок \varnothing 70 мм в размер \varnothing 80×120 мм, стабилизирующую термическую обработку поковок [1...3], и дальнейшие динамометрические и металлографические исследования, а также измерение твёрдости и шероховатости обработанной поверхности образцов. После предварительной механической обработки размеры образцов составляли \varnothing 70×110 мм, чистота их поверхности не хуже $R_a3,2$. Схемыковки соответствовали рекомендованным [4], номера схем и температуры нагрева заготовок перед ковкой приведены в таблице 1.

Пример расшивки процессаковки образца №6: нагрев, осадка до 60 мм, протяжка поперёк волокна, осадка до 60 мм, подогрев, вновь протяжка поперёк волокна и осадка до 60 мм, протяжка поперёк волокна в размерковки. Механическая обработка проводилась на токарном станке 16К20 при частоте вращения шпинделя 200 об/мин, подаче 0,1 мм на оборот и съёме 1 мм, с использованием прямых проходных резцов [5]. Проточка осуществлялась как по образующей, так и по торцу заготовок.

Таблица 1.

Технологические схемы и режимы ковки опытных заготовок

Марка стали, температура нагрева, °С	Номер образца	0	1	2	3	4	5	6
	Схема ковки	–	1	2	3	1	2	3
	07X16H6-III	–	1180	1180	1180	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

После ковки образцы из стали 07X16H6-III подвергались нормализации путём отжига при 780 ± 10 °С в течение 6 часов с охлаждением на воздухе до 20 °С, отпуску при 680 ± 10 °С с выдержкой 4 часа и повторному охлаждению на воздухе до 20 °С [1, 2].

Поковки из стали 12X18H10T-ВД для снятия напряжений проходили закалку в воде с нагрева до 1150 °С [2], а из стали 30ХГСА подвергались стабилизирующему неполному отжигу при температуре 780 ± 10 °С с выдержкой 1 час и охлаждению на воздухе до 20 °С [3]. Поковки из стали 50ХФА проходили нормализацию при температуре 650 ± 10 °С с выдержкой 1 час, далее при 810 ± 10 °С с выдержкой 2 часа, с охлаждением с печью до 200 °С и затем на шамотном полу, до уровня твёрдости \leq НВ 230 [3].

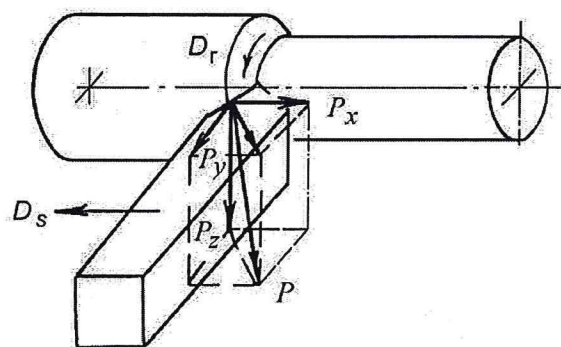


Рис. 1. Схема распределения нагрузок при токарной обработке детали

Шероховатость обработанной поверхности с помощью профилометра измерялась на образующей образцов.

Анализ металлографии и измерение твёрдости материала образцов проводились в контрольных точках, расположенных по направлению от приповерхностной части к центру сечения образца. Нагрузки на резец с измерялись с помощью цифрового динамометра в соответствии с представленной на рисунке 1 схемой, где координаты X, Y и Z, соответствуют силе подачи, радиальной силе и силе резания при токарной обработке детали [6, 7].

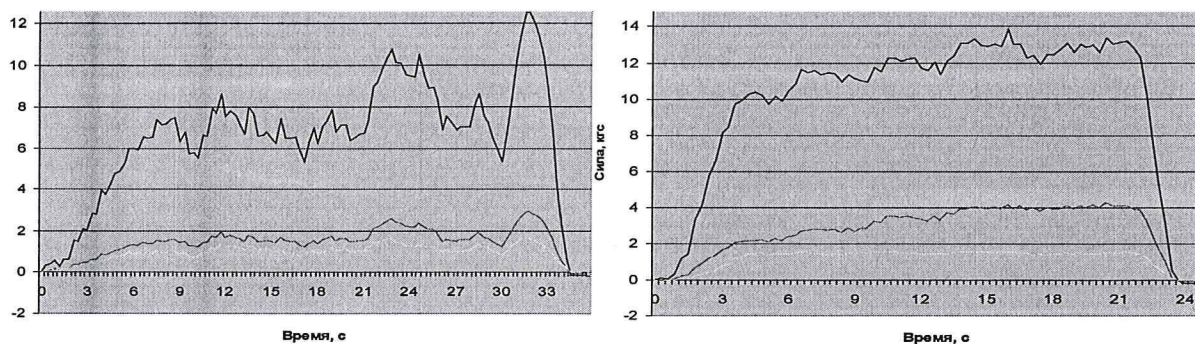


Рис. 2. Нагрузки на резец при проточке торца прутка (слева) и поковки б (справа).

Результаты и их обсуждение

Получены графики нагрузок на режущий инструмент (резец) по трем координатам: X, Y, Z, соответствующих силе подачи, радиальной силе и силе резания [6, 7] при проточке по образующей, и по торцу образцов. Картина распределения нагрузок при токарной обработке заготовки на примере стали 30ХГСА, представлена на рисунке 2 [8]. Здесь на графиках по горизонтальной оси показано перемещение резца по образующей заготовки за определённое время, в секундах, а по вертикальной оси – величина нагрузки на резец в координатах X, Y и Z в килограммах-силах, которые легко перевести в Н по известному соотношению. Более подробно с картинами распределения нагрузок на резец при обработке стальных заготовок, прокованным и термически обработанным по различным режимам, описано в работах [8, 9], а применительно заготовок из титанового сплава ВТ6 и алюминиевого сплава АМг6 – в работах [10, 11].

Из рисунка 2 следует, что величина и характер нагрузок на резец при точении по образующей материала показывают его меньшую сплошность относительно материала претерпевшего большую деформацию поковки. Кроме того, характер распределения нагрузок на резец при торцевой проточке прутка (рис. 2), свидетельствует о разрыве скоростей деформации в материале при их прокатке [12].

То же следует и из сопоставления структур материала прутков и поковок, представленных на рисунках 3, 4 и 5. Хорошо видно, что металлография прутковых заготовок отличается выраженной неравномерностью, крупным зерном, и наличием микропустот у тройных стыков зёрен, что связано с явлением опережения при прокатке [12] и вызываемым ей неравномерностью деформационных процессов и высоким уровнем остаточных напряжений в материале прутка. Такой материал может проявить свою склонность к автодеформациям и даже разрушению уже в составе готовой детали.

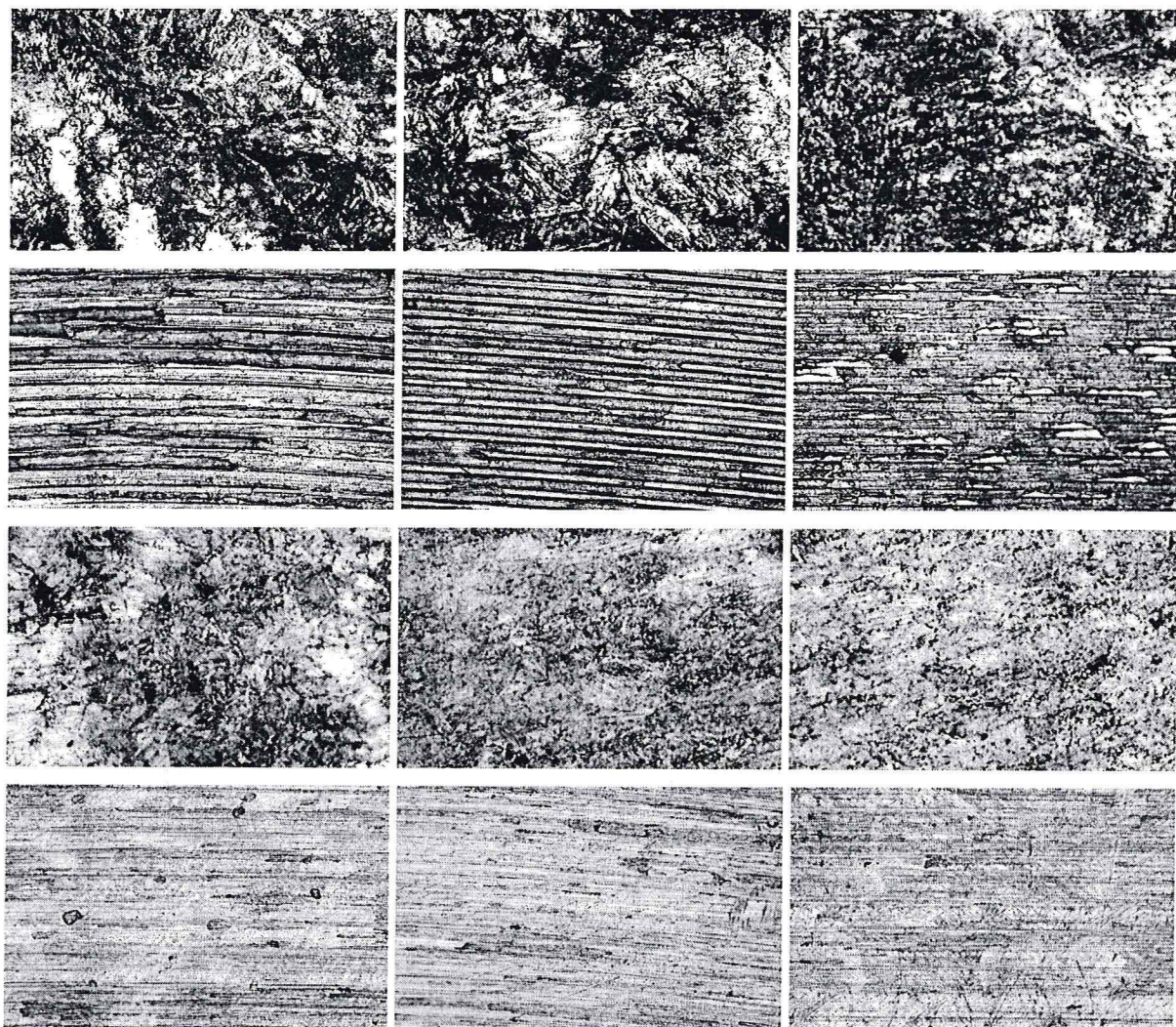


Рис. 3. Микроструктура ($\times 200$) и рельеф ($\times 100$) в контрольных точках обработанного торца прутка (вверху) и поковки 6 (внизу) из стали 07X16H2-III

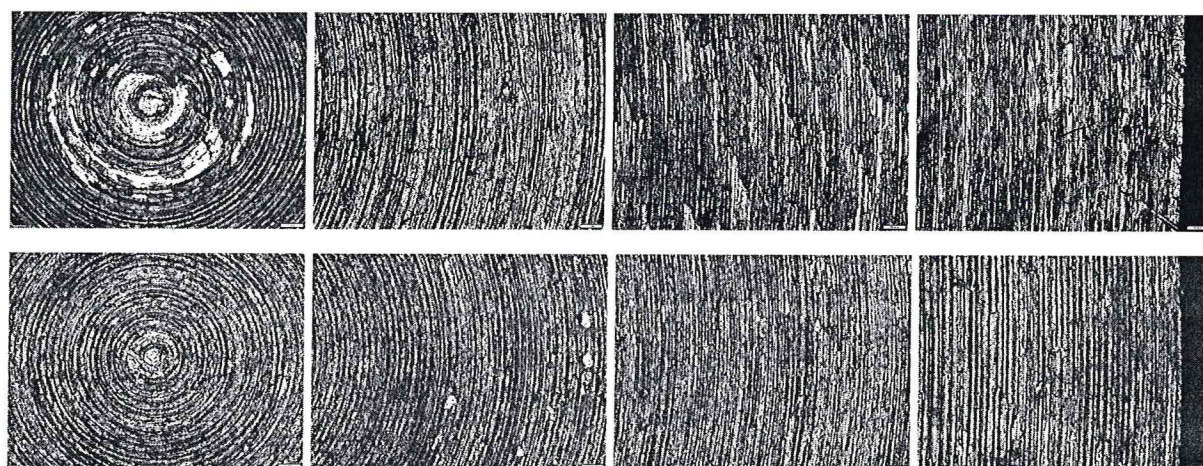


Рис. 4. Фактура торца прутка (вверху) и поковки 6 (внизу) из стали 30XГСА, $50\times$

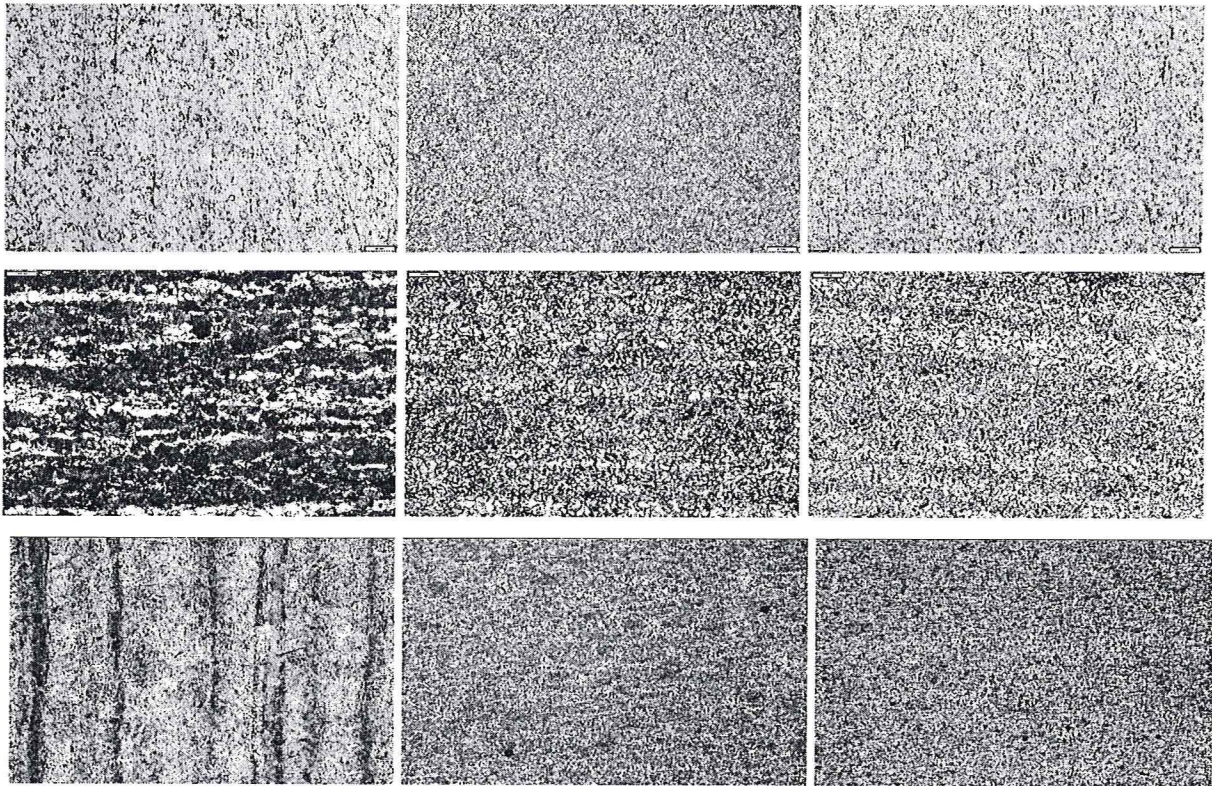


Рис. 5. Структура прутка (слева) и поковок 3 (в центре) и 6 (справа) из сталей 12Х18Н10Т-ВД (вверху), 30ХГСА (в центре) и 50ХФА (внизу), 100[×]

Распределение нагружающих инструмент сил в целом соответствует классическому их соотношению, согласно которому сила P_x изменяется в пределах от $1/8$ до $1/4$ величины силы резания P_z , а сила P_y – от $1/4$ до $1/2$ силы резания [6]. Ковочные операции уплотняют материал заготовок и измельчают его зерно, что отражается на его твёрдости и величине нагрузок на режущий инструмент. Это особенно заметно при торцевом точении, как это следует соответственно из таблиц 1 и 2, когда твёрдость материала растёт с увеличением его укова и уменьшением температуры деформации.

Характерно, что наибольший уровень нагрузок наблюдается при обработке исходного прутка и поковок, полученных по известной схеме 1 [4]. Это вызвано тем, что пониженная плотность срединных слоёв заготовок вызывает налипание материала заготовки на инструмент, и скачок уровня приходящих на резец нагрузок, что также отражено в таблице 2. Соответственно, неравномерное распределение напряжений и присутствующих в металлическом материале примесных фаз и изъянов в виде микропустот у тройных стыков зёрен, ухудшает качество поверхности получаемых деталей.

Таблица 2.

Нагрузки на резец по осям при проточке по образующей и по торцам образцов

Марка стали	№ образца	Нагрузки по осям при проточке, кг					
		По образующей			По торцу		
		x	y	z	x	y	z
07X16H2-III ¹	0 (пруток)	2,4±0,1	1,0±0,1	4,0±0,4	8...12	1,4...3,2	14...36
	3 (поковка)	3,6±0,2	2,3±0,2	7,0±0,5	12±0,2	6...9	21...24
	6 (поковка)	3,8±0,1	3,0±0,1	7,0±0,5	8...9	4...5,8	16...18
12X18H10T -ВД ²	0 (пруток)	2,1±0,1	1±0,1	3,6±0,2	4...5,5	2,2±2	6,5...9
	3 (поковка)	3,2±0,2	2,2±0,1	6,5...7,0	7,4...8	2,2±1	5,3...6,2
	6 (поковка)	2,6±0,1	2,8±0,1	6,8...7,0	7,8...8,2	2,2±1	5,5...6,3
30ХГСА ¹	0 (пруток)	1,8...2,2	1,0...1,7	6...12	2...4	1,7±0,1	10...13
	3 (поковка)	2,6...3,4	1,5...1,7	10...11	2,8...3,9	1,7±0,1	12...13,5
	6 (поковка)	4±0,1	1,7±0,1	12,7±0,2	4±0,1	1,7±0,1	12,5±0,3
50ХФА ¹	0 (пруток)	2,1±0,1	1,2...1,8	6,5...11	2,2...4	1,8±0,2	8,5...11
	3 (поковка)	2,6...3,7	1,4...1,9	11±0,5	2,9...3,9	1,9±0,2	9,7...11,5
	6 (поковка)	4,0...4,3	1,7...2,0	13,3±0,5	2,4±0,2	1,9±0,2	10...11,5

¹ - Съём при торцевой проточке 2,0 мм; ² - Съём при торцевой проточке 1,0 мм.

Содержание примесных фаз в материале повышается к центру сечения образцов, что объясняется явлением опережения при прокатке прутков. Ковочные операции уплотняют металлический материал, что отражается на его структуре, как это видно на рисунках 3 и 5, а также фактуре обработанной поверхности, показанной на рисунке 4. Это подтверждается также изменением значений твёрдости материала по сечению исходных прутковых и кованных заготовок, что отражено в таблице 4, и величине нагрузок на режущий инструмент, ранее показанных в таблице 2.

В целом, нагрузка растёт с увеличением укова и уменьшением температуры деформации, за исключением описанных выше случаев, касающихся исходного прутка и поковок № 1 и № 4. При этом распределение нагрузок становится более равномерным, а сходящая стружка становится менее ломкой, сливной, как описано в работах [8, 9]. Кроме того, дробление зерна в процессековки уменьшает относительное содержание зернограничных примесей, и залечивает изъяны у тройных стыков зёрен, уплотняя металлический материал, и делая материал детали более однородным и сбалансированным по свойствам [13].

Таблица 3.

Нагрузки на резец по осям при проточке по образующей и по торцам образцов

№ образца		Место измерения и размер зерна (мкм) / твёрдость, НВ			Шероховатость R _a , мкм	
		Центр	R/2	Край	Образующая	Торец
07X16H2-III	0 (пруток)	100 / 341	125 / 341	150 / 302	0,72	3,8
	3 (поковка)	20 / 375	25 / 388	30 / 388	0,54	3,71
	6 (поковка)	15 / 388	20 / 388	25 / 433	0,46	3,67
30XГСА	0 (пруток)	10 / 160	15 / 158	20 / 156	0,84	4,21
	3 (поковка)	5 / 184	7 / 182	10 / 184	0,62	3,84
	6 (поковка)	3 / 185	5 / 182	7 / 183	0,54	3,78
12X18H10T-ВД	0 (пруток)	20 / 134	25 / 132	30 / 128	0,68	3,72
	3 (поковка)	7 / 138	10 / 136	15 / 136	0,52	3,65
	3 (поковка)	5 / 139	7 / 137	10 / 139	0,46	3,62
50XФА	0 (пруток)	50 / 228	70 / 223	100 / 219	0,86	3,86
	3 (поковка)	5 / 232	7 / 227	10 / 223	0,62	3,58
	6 (поковка)	3 / 236	5 / 230	7 / 238	0,56	3,60

Таким образом, пролеживаются три зависимости, которые оказывают прямое влияние на однородность и шероховатость получаемой при точении поверхности.

Первая: по мере увеличения степени накопленной деформации и понижения её температуры повышается твёрдость металлического материала и уровень нагрузок на обрабатывающий инструмент. Соответствующие данные приведены в таблицах 1, 3 и 2.

Вторая зависимость состоит в том, что недостаточная деформационная проработка материала срединной части поковок вызывает увеличение его вязкости и резкий рост нагрузок на обрабатывающий инструмент, как это видно на рисунках 3 и 5 и следует из таблицы 2, вследствие его налипания на заднюю стенку резца [6, 7].

Третья зависимость: совпадение размера зерна с величиной съёма и / или подачи резца провоцирует образование многочисленных дефектов типа вырыв, характерный вид которых хорошо различим на фотографиях рисунков 1 и 2.

Сравнение микроструктуры материала и фактуры поверхности образцов показало, что вырывание материала при прохождении резца обычно происходит у тройных стыков зёрен, где имеют место скопления примесных фаз, что ухудшает шероховатость и длительную прочность получаемых из прутков и недостаточно проработанных поковок деталей [15].

Также установлено, что повышение плотности материала заготовок уменьшает шероховатость обработанной поверхности. Напротив, чем выше температураковки и меньше достигнутая деформационная проработка, тем крупнее зерно материала, и грубее поверхность проточенного образца.

Понижение температурыковки ограничивает развитие межзёренного механизма деформации со свойственной ему локализацией и разрывом деформационных скоростей [16]. Сложные схемыковки с перемещением очага деформации по объёму поковок дополнительно увеличивает роль внутризёренного деформационного механизма, повышая равномерность происходящих в их материале структурных и фазовых процессов [13], и тем улучшая его технологичность при обработке резанием.

Для всех исследованных сталей, ковкой заготовок достигается получение менее хрупкой сливной стружки, разрушение элементов которой учащается по мере увеличения деформационной проработки и снижения температурыковки металлического материала [8, 9], и показывает снижение нагрузок на резец и оборудование [6, 7]. Наилучшие результаты даёт использование схемыковки № 3 [4] с нагрева до наименьшей из рекомендованных температур, которым соответствуют образцы 3 и 6 из таблицы 3.

Выводы

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

2. Применение операций сложнойковки существенно повышают однородность структуры и свойств материала заготовок, через измельчение зерна и получение малонаправленной структуры снижают микрохимическую неоднородность и уровень напряжений металлического материала. В результате существенно улучшается обрабатываемость заготовок, снижается разброс нагрузок на режущий инструмент, достигается стабильно высокое качество поверхности обработанных деталей при отходящей мелкодробной, близкой к сливной, стружке.

3. Применение ковочных операций является простым и мало затратным способом комплексного повышения качества подвергаемых механической обработке заготовок, как на уровне структуры и свойств их материала, так и с точки зрения их технологических характеристик, улучшения обрабатываемости, снижения нагрузок на инструмент и оборудование.

Список источников

1. Применение и термическая обработка стали 07X16H6 (ЭП288, СН-2А): ПИ 1.2.038-77 / –М.: ВИАМ, 1978. -7 с.
2. Авиационные материалы / Справочник, т. 2 / Коррозионностойкие и жаростойкие стали и сплавы / –М.: ВИАМ, ОНТИ, 1975. -372 с.
3. Авиационные материалы / Справочник, т. 1 / Конструкционные стали / –М.: ВИАМ, ОНТИ, 1975. -430 с.
4. ПИ 1.2.085-78 / Ковка и штамповка деформируемых алюминиевых сплавов / –М.: ВИАМ, 1978, -17 с.
5. ГОСТ 18878-73 Резцы токарные проходные прямые с пластинами из твёрдого сплава. Конструкция и размеры / –М.: Издательство стандартов, 2017, -15 с., изм.
6. И.С. Амосов, В.А. Скраган / Точность, вибрации и чистота поверхности при токарной обработке / Изд. 2-е, под ред. М.А. Ансерова / –М.; –Л.: Машгиз, 1958. -90 с.
7. В.А. Кудинов / Динамика станков / –М.: Машиностроение, 1967. -359 с.
8. Головкин П.А., Крюков А.В. / Влияние предварительной деформации на структуру материала и качество поверхности при точении стали 30ХГСА / –М.: Технология машиностроения, № 10, 2022, с. 19...26.
9. Головкин П.А., Крюков А.В. / Влияние предварительной деформации на качество поверхности при чистовом точении стали 07X16H6-III / Технология машиностроения, № 10, 2023, с. 32...39.
10. Головкин П.А., Крюков А.В. / Влияниековки на структуру и качество поверхности при черновом точении титанового сплава BT6 / –М.: Титан, № 1, 2023.
11. Головкин П.А., Крюков А.В. / Влияние предварительной деформации на структуру и качество поверхности материала при точении сплава АМг6 / –М.: Технология машиностроения, № 6, 2023, с. 23...29.

12. Теория прокатки. Справочник / Целиков А.И., Томлёнов А.Д., Зюзин В.И., др. / –М.: Металлургия, 1982. -335 с.
13. Галкин В.И., Головкин П.А. / Об актуальности базовых технологий ОМД / – М.: Технология машиностроения, 2020, № 8, с. 35...39.
14. В.Н. Некрасов, А.О. Черданцев, П.О. Черданцев / Исследование процесса формирования шероховатости обработанной поверхности при точении / –Барнаул: Ползуновский вестник, № 3, 2016 г., с. 71...76.
15. Головкин П.А. / Повышение качества валов-торсионов стартер-генераторов с применением ковочных операций / –М.: Сборка в машиностроении, приборостроении, том 23, № 6, 2022, с. 52...54.
16. М.Я. Дзугутов / Напряжения и разрывы при обработке металлов давлением / изд. 2-е / –М.: «Металлургия», 1974. -280 с.