

УДК 621.785; 621.941.1

К ВОПРОСУ О РЕЖИМАХ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ 10864 ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТОЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ ПРИБОРОВ

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

ON THE QUESTION OF HEAT TREATMENT OF 10864 STEEL TO OBTAIN PRECISE PARTS OF ELECTRIC-VACUUM DEVICES

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

В статье обосновываются режимы термической обработки стали 10864, направленные на повышение точности размеров корпусных деталей электровакуумных приборов путём уменьшения уровня напряжений в материале исходных прутковых заготовок, и улучшения их обрабатываемости резанием.

Abstract

The article substantiates the modes of heat treatment of steel 10864, aimed at improving the accuracy of the dimensions of the body parts of electro-vacuum devices by reducing the stress level in the material of the original bar blanks, and improving their machinability by cutting.

Ключевые слова: сталь, прутки, заготовка, точные детали, автодеформирование, внутренние напряжения, отжиг, закалка, отпуск, твёрдость, механическая обработка, технологичность, стружка.

Key words: steel, bars, workpieces, precision parts, auto-deformations, internal stresses, annealing, quenching, tempering, hardness, machining, manufacturability, chips.

Общие положения

Сортовая электротехническая нелегированная сталь 10864 в вариантах открытой плавки [1], а также вакуумно-индукционной и вакуумно-дуговой плавки, обозначаемых также как сталь 03-ВИ и 03-ВД соответственно [2, 3], применяется для изготовления различных деталей электровакуумных приборов, в том числе и корпусных, обычно отличающихся филигранностью и точными размерами.



Рис. 1. Вид заготовки детали «Экран» и невыработок на её внутренней поверхности.

При изготовлении из стали группы 10864 таких деталей, паспортные характеристики коэрцитивной силы не всегда являются основными при назначении этого материала для использования в конструкции электровакуумных приборов. Например, когда нужно получить высокую точность получаемых размеров деталей после проведения механической и термической обработки, а также пайки-сборки со смежными деталями узлов. В этом случае важной задачей становится борьба с автодеформациями («поводками») заготовок, поскольку напряжения в исходном материале могут привести к их браку по признаку невыработки («черноты») на контрольных поверхностях, как это на примере типовой тонкостенной детали «Экран» показано на рисунке 1. Для объяснения причин появления такой невыработки, следует отметить расположение её мест на внутренней поверхности заготовок: их три, с углом между ними около 120° от оси симметрии, что соответствует распределению напряжений, формируемых в прутке при его прокатке в трёхвалковом стане.

Несмотря на относительно простой химический состав стали 10864, в документации и литературе не найти рекомендаций по ослаблению остаточных напряжений в заготовках из неё. Так, ТУ 14-1-896 [2] и ТУ 14-1-1683 [3] оговаривают применение печного оборудования с вакуумной, либо нейтральной средой для получения паспортных характеристик коэрцитивной силы и магнитной проницаемости, но не для ограничения поводок деталей и улучшения их обрабатываемости.

Необходимо отметить, что стали группы 10864 близки по основному своему химическому составу к распространённым сталям типа сталь СтЗкп, СтЗпс, СтЗс, которые, в свою очередь, отличаются повышенной склонностью к старению [4], а значит – и к поводкам после температурных воздействий и механической обработки.

Сопоставление действующей нормативной документации и справочной литературы показывает их несогласованность как в области терминологии, так и в собственно содержательной части. Так, ГОСТ 1050 [5] устанавливает предельную твёрдость нелегированных качественных сталей (стандартное определение), лишь начиная со стали 05кп, в то время как ГОСТ 380 [6] определяет химический состав сталей углеродистых обыкновенного качества (также стандартное определение), начиная со стали марки Ст0. Эти близкие по химическому составу к сортовым нелегированным электротехническим сталям по ГОСТ 11036, [1] (ещё одно определение) могут упрочняться путём закалки [7], но при этом некоторые источники их же называют не закаливающимися [8].

Далее. Известный справочник авиационных материалов [9] рассматривает свойства сталей, начиная лишь с группы 10, марочники сталей и сплавов [10, 11] – также с группы 10, или даже 20 [12], и только марочник стали для машиностроения ОМТРМ 0056-001-85, изданный Государственным комитетом по машиностроению при Госплане СССР в 1965 году, содержит решения по термической обработке стали СтЗпс, однако и в нём не приведена достигаемая при этом твёрдость материала [4].

Сравнение упрочнение сталей КСт1кп, КСтЗкп и КСт5кп при закалке с прокатного нагрева, либо после специального электронагрева показывает [13], что закалка с нагрева до более чем 950 °С вызывает снижение пластических свойств материала ввиду роста его напряжённости, вызванного фазовым наклёпом при $\gamma \rightarrow \alpha$ превращении и рекристаллизации аустенита. Имеются данные, что наилучшее сочетание механических свойств стали СтЗсп достигается при её закалке в воду с нагрева до 890...920 °С и последующем отпуске при 500 °С с дальнейшим охлаждением на воздухе [13]. При более низком нагреве в структуре стали сохраняется феррит, что пагубно отражается на её прочности, а нагрев выше 920 °С приводит к огрублению структуры и снижению пластичности [13]. Другие источники указывают на возможность повышения прочности и пластичности стали СтЗпс путём её закалки в воду с температуры 900 °С без проведения отпуска [14]. В общем, доступные данные и действующие документы касательно возможностей термической обработки сталей группы СтЗ носят несвязный характер.

Химический состав сталей 10864-ВИ, 10864 и СтЗпс, согласно ТУ 14-1-896 [2], ТУ 14-1683 [3], а также ГОСТ 11036 [1] и ГОСТ 380 [6], приведён в таблице 1. Здесь следует отметить, что только ГОСТ 380 [6] оговаривает предельное содержание в СтЗ таких элементов, как, например, мышьяк.

Таблица 1.

Химический состав стали марок СтЗпс (ГОСТ 380) и 10864; -ВИ; -ВД, %_{масс}, не более.

Стандарт, марка стали	Углерод	Марганец	Кремний	Фосфор	Сера	Медь	Кислород	Азот	Хром	Никель	Мышьяк
ГОСТ 380 СтЗпс	0,14... 0,22	0,40... 0,65	0,17... 0,37	0,050	0,050	0,30	–	0,012	0,35	0,35	0,080
ГОСТ 11036 10864	0,035	0,3	0,3	0,020	0,030	0,3	–	–	–	–	–
ТУ 14-1-896 10864-ВИ	0,025	0,15	0,15	0,010	0,010	0,20	0,004	0,010	–	–	–
ТУ 14-1683 10864-ВД	0,025	0,15	0,15	0,010	0,010	0,20	0,003	0,007	–	–	–

Другие нормативные документы на стали 10864 [1], 10864-ВИ (03-ВИ) [2] и 10864-ВД (03-ВД) [3] о них даже не упоминают. По-видимому, подразумевается, что их там не должно быть вовсе, что, конечно, не достижимо. Поэтому при обнаружении некоторого количества, например, примеси мышьяка, у потребителя нет основания для того, чтобы забраковать непригодный материал по требованиям к его химическому составу. В то же время, само назначение электротехнических сталей вакуумно-индукционной и вакуумно-дуговой выплавки подразумевает их химическую чистоту для наименьшего газовыделения в рабочую зону электровакуумных приборов [15].

В требованиях к химическому составу сталей группы 10864 также отсутствуют ограничения предельного содержания примесей висмута, селена и теллура, а также сурьмы [16, 17], обладающих низкими температурами плавления и высоким уровнем равновесного давления паров [18], и оттого представляющих опасность для чистоты рабочей зоны приборов ввиду своей сублимации [15] из материала деталей.

Выбор режимов термообработки прутковых заготовок из стали 10864

Выбор режимов термообработки прутковых заготовок из сталей группы 10864 для изготовления точных деталей производился исходя из основных назначенных условий. Одно из них – наименьшее окисление заготовок и соответственно, обеднение материала их приповерхностного слоя легирующими веществами, которое может привести к изменению его электромагнитных свойств. Другое условие – это собственно, снижение внутренних напряжений в материале заготовок, и обеспечение их технологичности при механической обработке и последующей пайке-сборке ввиду наличия тонких стенок и точных размеров в готовой детали.

На основании этих условий принято решение включить опробовать как различные варианты чистого отжига и закалки, так и их комбинации, а также закалку с последующим отпуском при различных температурах, что отражено в таблице 2.

Таблица 2.

Режимы пробных термообработок образцов и получаемая твёрдость их материала.

Номер опыта	Содержание термообработки	Твёрдость от центра к краю, НВ	Примечание
0	Горячекатаный, без термической обработки	82,6 – 78,3 – 65,5	Поставка по [2].
1	Отжиг 920 °С, выдержка 30 минут, охлаждение на воздухе	82,6 – 82,6 – 87,3	ОМТРМ 0056-001-85 [4], режимы для стали ВСТ2сп [11] и стали 10пс [9].
2	Отжиг 900 °С, выдержка 30 минут, закалка в воде	154 – 154 – 165	[14]
3	Нагрев до 950 °С, выдержка 10 минут, закалка в воде	125 – 125 – 148	–
4	Отжиг 650...680 °С, выдержка 1 час, охлаждение на воздухе	78,3 – 82,6 – 70,6	–
5	Отжиг 650...680 °С, выдержка 1 час, закалка в воде	134 – 143 – 143	–
6	Закалка с 900...920 °С в воду после выдержки 30 минут, отпуск 200 °С, выдержка 2 часа	127 – 128 – 119	ОМТРМ 0056-001-85 [4]
7	Закалка с 900...920 °С в воду после выдержки 30 минут, отпуск 350 °С, выдержка 2 часа	123 – 122 – 117	ОМТРМ 0056-001-85 [4]
8	Закалка с 900...920 °С в воду после выдержки 30 минут, отпуск 500 °С, выдержка 2 часа	92,8 – 89,2 – 93,9	ОМТРМ 0056-001-85 [4]
9	Закалка с 790...810 °С в воду после выдержки 30 минут, отпуск 200 °С, выдержка 2 часа	88,2 – 86,8 – 88,2	Режим для стали 10 [9, 10]
10	Отжиг 800 °С, выдержка 6 часов, охлаждение с печью 30 °С в час до 500 °С, далее на воздухе	88,6 – 78,7 – 73,5	14-1-896 [2], ТУ 14-1-1683 [3]

Образцы представляли собой цилиндры диаметром Ø 70 мм и высотой 12 мм из стали 10864-ВИ. Твёрдость материала сравнивалась с таковой у материала исходного горячекатаного не отожжённого прутка, что также отражено в таблице 2.

Значения твёрдости измерялись по методу Бринелля [19] в трёх точках – в центре образца (точка 1), на расстоянии 10 мм от его края (точка 3), и между этими местами (точка 2). Диаметр шарика составлял 10 мм, испытательная нагрузка на него – 98 КН. Продолжительность нагрева заготовок в электрической печи определялась исходя из рекомендаций [20], их температура помимо данных от термопары печи дополнительно определялась с использованием лазерного и оптического пирометров.

С целью исключения влияния на результаты измерения химического состава обеднения поверхностного слоя материала образцов при их термической обработке легирующими компонентами, перед измерением твёрдости образцы торцевались с двух сторон со съёмом не менее 1 мм на сторону, и далее шлифовались с двух сторон с шероховатостью не более Ra 1,6. Для анализа приведённых в таблице 2 данных полезно указать, что температуры начала и конца превращения $\alpha \rightarrow \gamma$ при нагреве – нижняя и верхняя критические точки, составляют соответственно $A_{c1} = 735 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $A_{c3} = 854 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [10, 12], в то время как температуры начала и конца превращения $\gamma \rightarrow \alpha$ при охлаждении – верхняя и нижняя критическая точки, равны $A_{r3} = 835 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $A_{r1} = 682 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [10, 12].

Это означает, что технологические решения 4 и 5 способствуют меньшему окислению и обеднению легирующими компонентами материала заготовок, но и меньше меняют их форму, поскольку не задействуют полиморфные превращения в материале. Однако решение 4 не обеспечивает необходимого для удовлетворительной обрабатываемости заготовок уровня твёрдости их материала.

Следует также отметить, что повышение температуры нагрева под закалку с 600 до 900 $^{\circ}\text{C}$ не вызывает заметного уширения линии в направлении (220) железа и напряжений второго рода в материалах из него [13]. Однако, при нагреве железа выше точки A_{c3} , на фоне роста его твёрдости, которая существенно возрастает, имеет место резкое возрастание уширения и микронапряжений в материале [13], что требует проведения дополнительного отпуска после закалки.

Опыты показали, что проведение закалки в воде для снятия напряжений даже с температур, намного превышающих температуры полиморфного превращения в железе, без проведения необходимой предварительной выдержки, не даёт ожидаемого снятия напряжений и уменьшения поволок деталей. Так, закалка в воду заготовки после 10 минут выдержки её в печи при температуре 950 $^{\circ}\text{C}$ по режиму 3, не позволила в достаточной мере уменьшить в ней уровень наследуемых от прутка напряжений, и при токарной обработке на внутренней поверхности заготовки типовой детали «Экран» образовались показанные на рисунке 1 места невыработки («черноты»).

Как указано выше, расположение мест невыработки при проточке деталей повторяют картину распределения в материале заготовок наследственных напряжения от прокатки исходного прутка в трёхвалковом стане. Изготовленные из находившихся в печи при температуре нагрева более 30 минут детали, не обнаруживают такого порока.

Поскольку родственная стали 10863 сталь Ст3 по косвенным данным обладает прокаливаемостью более 50 мм [13, 14], это значение принять как достаточное для протекания нормализации материала, в частности, выравнивания его химического состава. Следует отметить, что доступные данные о прокаливании нелегированных качественных сталей (углеродистых сталей обыкновенного качества) противоречивы, что представляет при работе с ними определённую сложность.

Что касается твёрдости, на которую следует обрабатывать материал для повышения его технологичности при механической обработке, то наименьший уровень твёрдости, обеспечивающий удовлетворительную обрабатываемость резанием можно определить по косвенным признакам: в марочниках стали и сплавов приведены стандартные оценки её обрабатываемости при НВ 124 [4, 10, 11] и НВ 137 [12]. Эти значения можно принять за основу при выборе режимов термической обработки при оценке минимально необходимого достигаемого уровня твёрдости материала.

В таком случае решения 1, 6, 7, 8, 9 и 10 не могут быть оценены как годные, поскольку не обеспечивают минимально необходимую для механической обработки твёрдость материала, а кроме того, эта твёрдость сильно изменяется по сечению прутка.

Решение 3 даёт материалу технологически необходимую твёрдость, но не снимает в нужной степени напряжения, и потому также должен быть отклонён. Тогда в качестве приемлемых решений можно рассматривать таковые за номерами 2 и 5.

Решение 2: отжиг 900 °С в течение 30 минут, закалка в воде, достигаемая твёрдость по направлению от центра заготовки к её краю НВ 154–154–165. Решение 5: отжиг при 650...680 °С с выдержкой 1 час, закалка в воде с получаемой твёрдостью материала НВ 134–143–143.

Решение 5 даёт наименьший уровень окисления поверхности заготовок при необходимом уровне твёрдости их материала и снятии обусловленных способом изготовления прутков напряжений, а кроме того, температура нагрева заготовок не превышает значений начала и конца полиморфного превращения в стали 10864, отчего деформация заготовок при закалке остаётся наименьшей. Механическая обработка таких заготовок показывает, что равномерность схождения стружки превышает такую при других предлагаемых технологических решениях.

Анализ образцов, изготовленных в соответствии с ОМТРМ 0056-001-85 [4], показал недостаточные значения получаемой твёрдости материала относительно значений, рассматриваемых как базовые для технологической оценки его обрабатываемости резанием [4, 10, 11]. Из данных таблицы 2, на примере образцов 3, 6, 7, 8 и 9 видно, что температура нагрева под закалку 790...810 °С является недостаточной для получения необходимой технологической твёрдости материала, а температура отпуска 350 °С и более, - наоборот, избыточна и приводит к его излишней мягкости, способствующей образованию дефектов на проточенной поверхности.

Также из таблицы 2 следует, что применение одного лишь отжига образцов 1, 4 и 10 при различных температурах также не обеспечивает получение минимально необходимой технологической твёрдости материала образцов. Особо следует отметить, что прописанные в ТУ 14-1-896 [2] и ТУ 14-1-1683 [3] режимы не обеспечивают достижение минимальной технологической твёрдости материала, что следует учитывать при разработке технологий обработки деталей.

Целесообразно рассмотреть особенности получаемой при проточке термически обработанных заготовок стружки. Одной из основных характеристик отходящей при токарной обработке стружки является её склонность к дроблению, то есть степень её склонности к разрушению в момент выхода из-под резца. Соответственно, стружка может быть более сливной, либо более ломкой. Сливная стружка затрудняет её удаление из зоны обработки детали, слишком хрупкая – не позволяет получить поверхность высокой чистоты, которая после проточки изобилует вырывами (сколами), затирами – следами от грата на задней поверхности резца, и другими дефектами.

На рисунке 2 показан общий вид стружки от проточки обработанных по решениям 2 и 5 образцов, на рисунке 3 стружка показана укрупнённо. На рисунке 2 видно, что стружка от образца 2 несколько более напряжённая и беспорядочно выходящая, чем стружка от образца 5, её витки более прихотливы.

Более мягкая стружка показывает близкий к образцовому характер схода – её витки равномерны и не перепутаны на большом своём протяжении. Фактура стружки на рисунке 3 показывает, что для более твёрдого материала дробность её отделения резцом несколько выше, чем для более мягкого, и стружка имеет выраженные продольные борозды. Оба образца стружки отличаются ровным сходом и отсутствием ярко выраженных изломов, однако более равномерное стружкообразование, при прочих равных условиях, свидетельствует о меньшем уровне привносимых в материал заготовки напряжений уже в процессе самой механической обработки.



Рис. 2. Общий вид стружки при точении образцов 2 (слева) и 5 (в центре и справа).

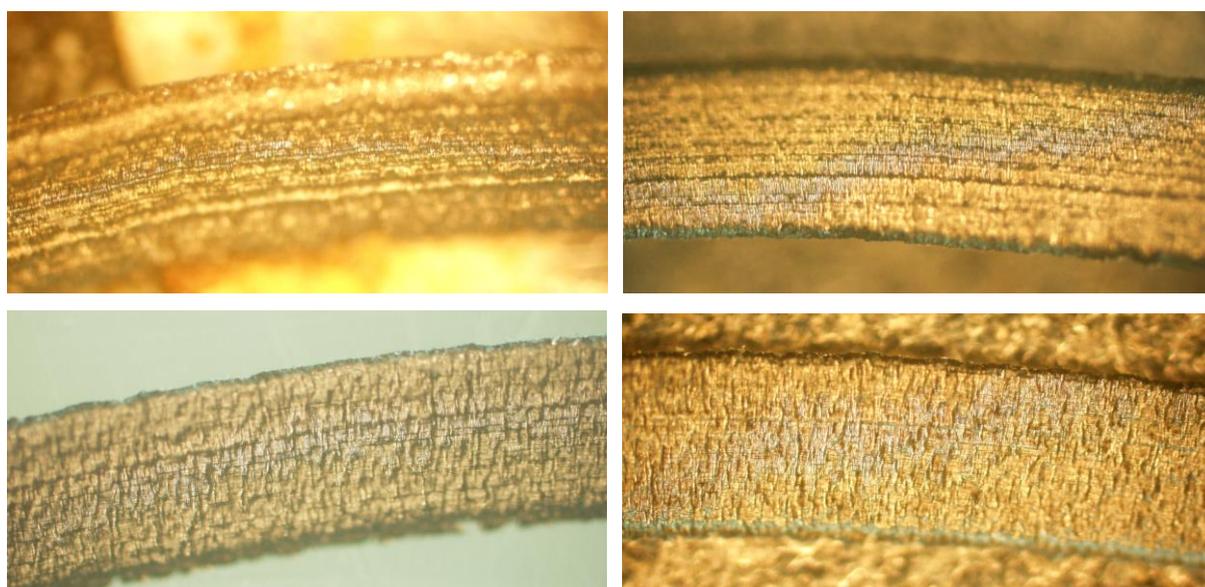


Рис. 3. Поверхность стружки при точении образцов 2 (вверху) и 5 (внизу), 100[×].

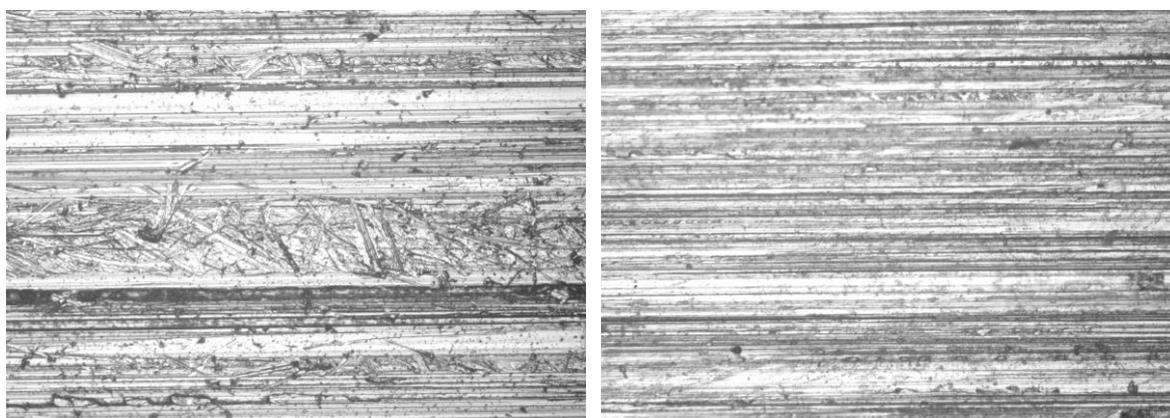


Рис. 4. Поверхность образцов с НВ 70,6...78,3 (слева) и НВ 154...165 (справа), 100[×].

Как следствие, готовые детали при последующей пайке-сборке будут менее склонны к поводкам уже от напряжений механической обработки, однако сравнение образцов с твёрдостью НВ 70,6...78,3 и НВ 154...165 после их шлифования с шероховатостью R_a 3,2 показывает значительную дефектность поверхности более мягкого материала, как это видно на рисунке 4.

Сопоставляя окисление, твёрдость, вид стружки и обработанной поверхности материала, можно сделать вывод и пригодности вариантов 5, 6 и 9 термообработки. Дальнейший выбор технологического решения может быть определён исходя из таких показателей детали, как тонкостенность, количество выточек и поднутрений, температура пайки-сборки, и других. С учётом сложности изготовления деталей, на различных его шагах могут быть использованы оба варианта термической обработки.

Выводы

1. Не смотря на многолетнее производство и относительно простой химический состав, стали группы 10864 являются материалом, требования к которому недостаточно проработаны с точки зрения его использования в составе электровакуумных приборов.

2. Определяемый техническими условиями на вакуумно-индукционный и вакуумно-дуговой способы выплавки химический состав стали 10864 не учитывает особенности работы электровакуумных приборов, что может привести к нарушению чистоты их рабочего пространства и выходу из строя.

3. В нормативных документах отсутствуют режимы термической обработки прутков из стали 10864, направленные на снижение в их материале остаточных напряжений от прокатки, которые могли бы в нужной степени уменьшить автодеформации тонкостенных корпусных деталей.

4. Для снятия напряжений в материале прутков наиболее подходит закалка в воду с нагрева до $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ после выдержки заготовок в печи не менее 30 минут, меньшее время выдержки не понижает напряжений в нужной мере. Достижимая твёрдость материала НВ 154...165 улучшает обрабатываемость при точении и шлифовке. Недостатком такого решения является повышенное окисление заготовок и обеднение легирующими составляющими материала их приповерхностного слоя.

5. Для уменьшения окисления материала может быть рекомендована закалка стали с температуры $650\text{...}680\text{ }^{\circ}\text{C}$ после выдержки в течение 1 часа. Такая обработка обеспечивает твёрдость материала НВ 134...143, технологически достаточную для его удовлетворительной обрабатываемости резанием. В этом случае температура закалки не превышает порога полиморфного превращения в сталях группы 10864, что снижает изменение формы заготовок при самой термической обработке.

6. Предписанная ТУ 14-1-896-74 и ТУ 14-1-1683 термическая обработка ввиду недостаточной достигаемой твёрдости, не обеспечивает удовлетворительной технологичности материала как при его точении, так и при шлифовании, отчего образованная поверхность изобилует многочисленными дефектами. Кроме того, такая термическая обработка недостаточна для снятия в материале заготовок напряжений, переходящих в них из исходного прутка, и готовые детали отходят в брак по признаку недопустимых величин автодеформации после механической обработки и пайки-сборки.

Список литературы

1. ГОСТ 11036-75 «Сталь сортовая электротехническая нелегированная. Технические условия»;
2. ТУ 14-1-896-74 «Прутки горячекатаные и кованые из низкоуглеродистой стали марки 10864 (03-ВИ). Технические условия»;
3. ТУ 14-1-1683-2005 «Прутки из низкоуглеродистой стали марки 10864-ВД (03-ВД). Технические условия»;
4. ОМТРМ 0056-001-65 Марочник сталей для машиностроения / коллективное издание / Под общим руководством и ред. Гос.-ного комитета по машиностроению при Госплане СССР / –М.: НИИ информации по машиностроению, 1965. -595 с.: ил.
5. ГОСТ 1050-2014 Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия / Стандартиформ, 2014. -32 с.
6. ГОСТ 380-2005 Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки / –М.: Стандартиформ, 2009. -13 с.; изм.
7. В.Н. Журавлёв, О.И. Николаева / Машиностроительные стали. Справочник для конструкторов / –Москва, Свердловск.: Машгиз, 1962. -238 с.
8. З.Н. Красильщиков, Н.В. Шмидт, Е.Н. Швач, др. / Термическое упрочнение незакаливающейся углеродистой стали / –Л.: Судпромгиз, 1960. -148 с.
9. Авиационные материалы / справочник в 10 т. / издание 6-е, переработанное и дополненное / под общей ред. А.Т. Туманова / Том 1. Конструкционные стали / под ред. Н.М. Склярова, Я.М. Потак / –М.: ВИАМ, ОНТИ, 1975. -430 с.
10. Стали и сплавы. Марочник: Справочное издание / В.Г. Сорокин, М.А. Гервасьев, В.С. Палеев, др. / Под ред. В.Г. Сорокина, М.А. Гервасьева / –М.: Интермет Инжиниринг, 2001. -608 с.: ил.

11. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волоснякова, С.А. Вяткин и др. / Под общей ред. В.Г. Сорокина / –М.: Машиностроение, 1989. -640 с.: ил.
12. Марочник сталей и сплавов / 4-е изд., переработ. и доп. / Ю.Г. Драгунов, А.С. Зубченко, Ю.В. Каширский и др. / Под общей ред. Ю.Г. Драгунова и А. С. Зубченко / – М.: Инновационное машиностроение, 2014. -1216 с.: ил.
13. М.Е. Блантер, А.А. Гольденберг / Термическое упрочнение низкоуглеродистой нелегированной стали / Научно-техническое общество машиностроительной промышленности / Университет технического прогресса в машиностроении / –М.: Машиностроение, 1967. -42 с.
14. К.Ф. Стародубов, И.Г. Узлов, В.Я. Савенков, др. / Термическое упрочнение проката / под ред. К.Ф. Стародубова / –М.: Металлургия, 1970. -368 с.
15. Д.Е. Самсонов / Основы расчёта и конструирования магнетронов / –М.: Советское радио, 1974. -328 с.
16. А.В. Рябов, Д.Я. Поволоцкий, В.В. Рябов, др. / Влияние технологии легирования автоматной стали на усвоение висмута / –М.: МИСиС, Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. Номер 3, 2004. –С. 3...5.
17. Заславский А.Я. / Современные автоматные стали. Состав, включения, свойства / М-во образования и науки РФ, Федеральное агентство по образованию, Южно-Уральский гос. ун-т. / –Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2005. -205 с.
18. Физические величины. Справочник. / Коллектив авторов по ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова / –М.: Энергоатомиздат, 1991, -1231 с.; ил.
19. ГОСТ 9012-59 Металлы. Измерение твёрдости по Бринеллю / –М.: Стандартинформ, 2007. -40 с.; изм.
20. Ковка и штамповка: справочник в 4-х томах / Том 1. Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка / – 2-е изд., перераб. и доп. / под общ. ред. Е.Н. Семёнова / –М.: Машиностроение, 2010. -717 с.: ил.