

**О НЕКОТОРЫХ ПРИЧИНАХ АВТОДЕФОРМАЦИИ ТОЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ
СПЛАВА 29НК-ВИ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ПОЛУЧЕННЫХ ХОЛОДНОЙ ВЫТЯЖКОЙ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК**

П.А. Головкин, 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 SOME CAUSES OF AUTO-DEFORMATION OF PRECISION PARTS MADE OF
“Fe-29%Ni-13%Co - VACUUM MELTING” ALLOY USING COLD-DRAWN
SHEET BLANKS**

P.A. Golovkin, Ph. D.

Pluton JSC, 11 Nizhnyaya Syromyatnicheskaya St., Moscow, 105120, Russia.

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

Аннотация

Рассматриваются причины изменения размеров точных деталей из прецизионного сплава 29НК-ВИ при их изготовлении из полученных путём холодной штамповки исходных горячекатаных листовых заготовок. Проведено моделирование процесса вытяжки заготовок использованием основанного на методе конечных элементов программного продукта QForm. Сопоставление расчётных значений накопленных деформаций по объёму штампованных заготовок с величиной их автодеформаций при дальнейшей обработке, позволило выявить их причины и устранить их путём строгого соблюдения режимов термической обработки заготовок и деталей, изложенных государственном стандарте на требования к пруткам и листам из сплава 29НК-ВИ.

Annotation

The causes of changes in the dimensions of precision parts made of precision alloy “Fe-29%Ni-13%Co -vacuum melting” (russian abbreviation “29НК-ВИ”) when they are produced from initial hot-rolled sheet blanks obtained by cold forging are considered. Simulation of the drawing process of workpieces by using the finite element method based software product Q-Form has been conducted. Comparison of the calculated values of the accumulated strains on the volume of forged blanks with the value of their auto-deformations during further processing, allowed to identify their causes and eliminate them by strict compliance with heat treatment of blanks and parts specified in the state standard on the requirements for rods and sheets of alloy “Fe-29%Ni-13%Co -vacuum melting”.

Ключевые слова: прецизионных сплав, листы, холодная штамповка, математическое моделирование, заготовки, напряжения, деформации, автодеформации, термическая обработка, пролёживание, точные детали, калибр-пробки, изменение размеров, брак.

Keywords: precision alloys, sheets, cold forging, mathematical simulation, billets, stresses, deformations, auto-deformations, heat treatment, time, precision parts, testing tool, dimensional changes, defective product.

1. Общие положения

Распространённым типом корпусных деталей электровакуумных приборов являются детали типа «экран», основу формы которых составляет тонкостенный полый цилиндр. Поскольку изготовление такого рода деталей из прутка связано в большом объёме механической обработки и уходом металла в стружку, их как правило, изготавливают из полученных путём холодной вытяжки листовых заготовок. Учитывая невысокую стоимость и распространённость, значительная часть корпусных деталей электровакуумных приборов изготавливают из прецизионного сплава 29НК-ВИ, химический состав которого прописан в ГОСТ 10994 [1] и приведён в таблице 1.

Таблица 1.

Химический состав сплава 29НК-ВИ, % масс.

Железо	Никель	Кобальт	Углерод	Кремний	Марганец	Медь
Основа	29,5...30,5	17,0...18,0	≤ 0,03	≤ 0,28	≤ 0,4	≤ 0,2
Хром	Сера	Фосфор	Азот	Кислород	Водород	Σ примесей
≤ 0,1	≤ 0,015	≤ 0,015	≤ 0,01	≤ 0,008	≤ 0,001	≤ 1,0

В процессе преобразования исходных горячекатанных листов из сплава 29НК-ВИ, поступающих по требованиям ГОСТ 14082-78 [2] путём холодной трёхступенчатой вытяжки в штампованную заготовку типа стакан, в её материале накапливаются значительные внутренние напряжения, иногда вызывающие существенные его автродеформации, выводящие чистовые размеры готовых деталей за пределы установленного для них допуска. Поскольку само использование прецизионного сплава 29НК-ВИ как сплава с заданным температурным коэффициентом линейного расширения [1], направлено на поддержание наименьшего уровня напряжений получаемых деталей со смежными деталями в узлах, и на постоянство точных размеров деталей, причины такой автодеформации должны быть установлены, и приняты меры для её предотвращения. Служебные свойства сплава в соответствии с ГОСТ 14082 [2], приведены в таблице 2.

Здесь следует сразу указать, что перечисленные свойства материала в соответствии с ГОСТ 14082 [2], могут быть получены только при прохождении им приведённой в этом документе термической обработки. А именно: отжиг в водороде, вакууме или защитной атмосфере при температуре $(960 \pm 20)^\circ\text{C}$, выдержка 1 час, далее охлаждение с печью или контейнером до 200°C со скоростью не более $10^\circ\text{C}/\text{мин}$. В противном случае свойства материала могут существенно отличаться от заявленных.

Таблица 2.

Коэффициент линейного расширения сплава 29НК-ВИ при различных температурах

Марка	Коэффициент линейного расширения λ , $\alpha_{\text{тр}} \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$, при температурах, $^\circ\text{C}$					Температура точки перегиба, не ниже, $^\circ\text{C}$
	-100...-20*	-70...-20*	20-300	20-400	20-500	
29НК-ВИ	6,3	6,5	4,6-5,5	4,5-5,2; 4,6-5,2**	5,9-6,4	420
Примечание: * - по данным источника [3] для сплава 29НК; ** - для сплава 29НК, [2].						

2. Базовый технологический процесс и возможные автодеформации заготовок

Как было указано выше, базовый технологический процесс предусматривает изготовление экранов из полученных из горячекатаного листа толщиной 4,5 мм по ГОСТ 14082 [2] заготовок типа стаканов. Из листа на кривошипном прессе вырубается круглые заготовки, которые далее путём холодной вытяжки на гидравлических прессах превращаются в штампованные заготовки. Вытяжка стаканов производится с использованием жёстких пуансонов и матриц на гидравлическом прессе с максимальным усилием 4 МН (≈ 400 т.с.). за 3 перехода с промежуточными отжигами в проходных водородных электрических печах. Коэффициент вытяжки [4] на первом переходе составляет $m=0,71$, а на втором и третьем – 0,8. После третьего перехода вытяжки у полученных стаканов отрезается дно, обрезаются фестоны на свободном торце, и далее токарной обработкой получают цилиндрические заготовки типа трубок под дальнейшую механическую обработку в деталь типа экран.

В данном случае механическая обработка производится на не отожжённом материале, который лучше обрабатывается резанием, чем не прошедший отжиг, поэтому отжиг для снятия напряжений производится уже после получения заготовок – трубок. Вид штампованных заготовок без обрезки их торцев, проточенной заготовки-трубки и заготовок экранов, представлен на рисунке 1.

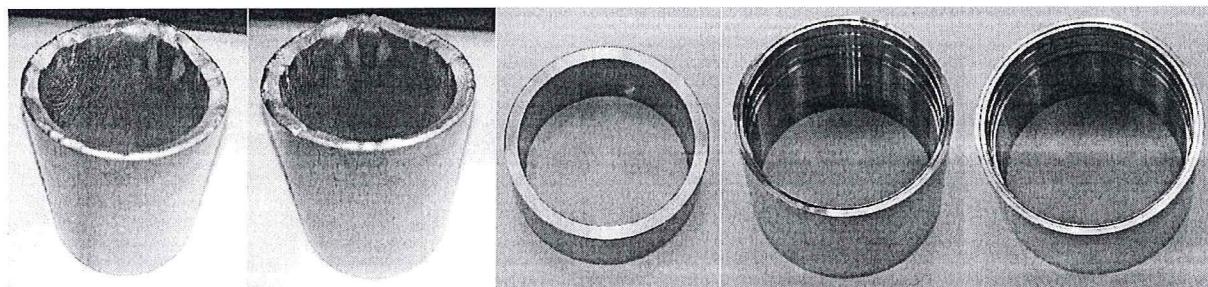


Рис. 1. Стаканы после третьей вытяжки, заготовка – трубка и заготовки экранов.

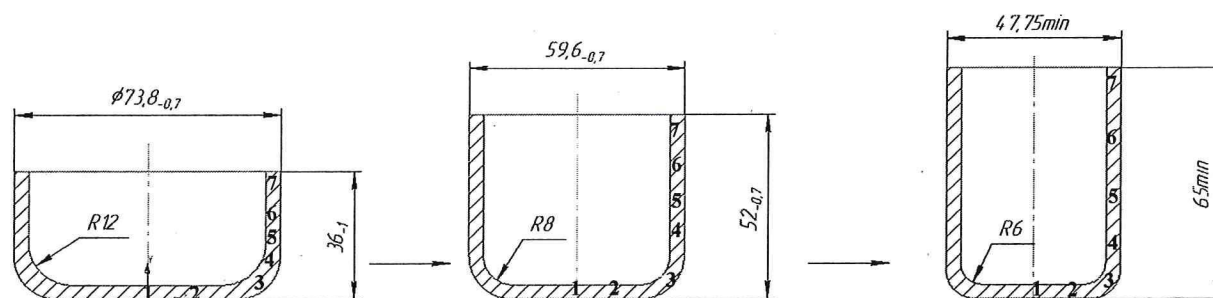


Рис. 2. Основные размеры и контрольные точки в заготовках стакана по переходам.

Схема штамповки по переходам с указанием основных размеров заготовок – на рисунке 2. Также на рисунке 2 показано расположение по сечению штампованных заготовок контрольных точек. Значения рабочих радиусов пуансонов и матриц по переходам и рассчитанный в соответствии с [4] зазор между ними приведён в таблице 3. Исходя из геометрии заготовок и указанных в таблице характеристик штамповой оснастки, проведены расчёты значений сопротивления материала заготовок деформации и значения накопленной им деформации в контрольных точках.

Таблица 3.

Рабочие характеристики штамповой оснастки по переходам.

№ перехода	Ø заготовки / штамповки, мм	R пуансона, мм	R матрицы, мм	Величина зазора (z), мм	Степень вытяжки, m
1	110,0 / 73,8	12	14	4,81	0,71
2	73,8 / 59,6	8	12	4,86	0,80
3	59,6 / 48,0	6	12	4,86	0,80

Расчёты по переходам осуществлялись с использованием основанного на методе конечных элементов российского программного продукта QForm [5], их значения сведены в таблицу 4. По данным таблицы 4 построены графики изменения накопленной материалом заготовок деформации по шагам и переходам, показанные на рисунках 6...8.

Из графиков и картин распределения накопленных деформаций видно, что наибольший её рост имеет место на 2...4 шагах формоизменения заготовки, и более резко – вблизи контрольных точек 3 и 4. Это обусловлено тем, что здесь материал заготовки претерпевает вытяжку непосредственно в рабочем зазоре между пуансоном и матрицей, в условиях наиболее жёстких нагрузок, в том числе, и в связи с трением об инструмент. Об этом свидетельствуют и значения сопротивления деформации материала заготовок, что также отражено в таблице 4 и показано на рисунках 3...5.

Таблица 4.

Сопротивление деформации и накопленная деформация в материале заготовки при вытяжке по переходам и стадиям формоизменения заготовки.

№ перехода, № стадии	Сопротивление деформации, Мпа / накопленная деформация, логарифмических единиц (лог. ед.) в контрольной точке за номером:						
	1	2	3	4	5	6	7
1.1	231,5/0,01	236,9/0,08	265,3/0,05	253,3/0,02	232,6/0,007	222,3/0,002	207,8/0,008
1.2	208/0,029	202/0,17	224,7/0,4	273,4 /0,35	244,1/0,1	258,1/0,02	256,6/0,01
1.3	184,1/0,029	185,1/0,19	207/0,41	216,4/0,43	242,1/0,3	257,8/0,06	267,7/0,018
1.4	171,4/0,03	170,2/0,23	179/0,41	201,8/0,52	188/0,45	239/0,38	245,5/0,1
1.5	169,3/0,03	169,5/0,27	166,9/0,43	162,6/0,55	162,2/0,48	168/0,47	243/0,28
1.6	169,2/0,03	169,5/0,28	167,5/0,44	162,4/0,58	162,2/0,51	159,1/0,48	164,3/0,031
1.7	169,6/0,03	169,6/0,29	164,5/0,45	162,6/0,6	162/0,52	156,6/0,49	143,3/0,32
2.1	204,5/0,009	206,1/0,11	217/0,047	277,9/0,011	256,2/0,03	256,7/0,006	254/0,009
2.2	240,1/0,02	239,4/0,012	267,9/0,04	276/0,026	261,2/037	263,5/0,008	270,6/0,006
2.3	183,8/0,029	184,1/0,18	214,6/0,28	206,5/0,039	208,5/0,19	172,1/0,044	194,1/0,013
2.4	175,9/0,029	177,3/0,22	199,2/0,39	193,7/0,48	185,6/0,39	172,9/0,19	243,4/0,01
2.5	169,1/0,030	169,9/0,22	176,1/0,43	193,5/0,54	185,2/0,4	172,1/0,25	243,1/0,03
2.6	169,3/0,030	168,7/0,23	169,8/0,45	176,0/0,56	193,2/0,44	185,1/0,31	192,8/0,09
2.7	169/0,030	169,3/0,23	162,1/0,46	148,4/0,57	149,2/0,49	174/0,38	202/0,28
3.1	276,8/0,0007	276,9/0,12	281,1/0,005	260,2/0,01	285/0,001	285,8/0,001	283,6/0,001
3.2	277,1/0,003	275,5/0,16	277,5/0,55	272,1/0,33	243,7/0,03	236,2/0,006	261,3/0,003
3.3	276,8/0,006	276/0,18	266,8/0,59	241/0,41	232,5/0,13	218/0,01	270/0,012
3.4	275,5/0,017	275,1/0,19	269/0,64	244,2/0,46	236,5/0,44	243,8/0,26	275,6/0,012
3.5	274,8/0,02	275,1/0,19	268,6/0,65	243,2/0,47	238,5/0,45	243,8/0,36	275,6/0,53
3.6	275,5/0,021	275,1/0,20	269/0,66	244,4/0,47	235,9/0,45	242,7/0,39	275,6/0,18
3.7	275,2/0,03	275,1/0,021	269,3/0,66	244,2/0,49	236,5/0,45	243,8/0,39	243,8/0,26

Далее, накопленные деформации и сопротивление им материала возрастают уже более плавно, но и по завершении штамповки, они распределены не равномерно. В то время, как дно стакана отделяется от заготовки, разность деформационной проработки материала продолжает влиять на постоянство размеров её и готовой детали, и далее – на их автодеформацию при пайке-сборке, либо сварке, со смежными деталями и узлами.

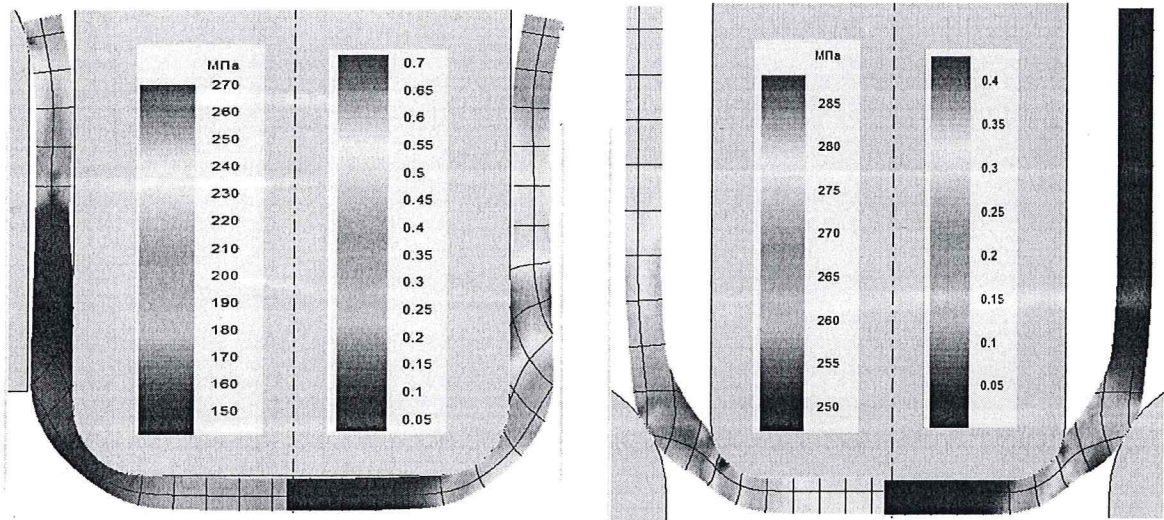


Рис. 3. Сопротивление деформации, МПа и распределение накопленных деформаций, лог. ед. по сечению заготовки в момент завершения перехода 2 и в начале перехода 3.

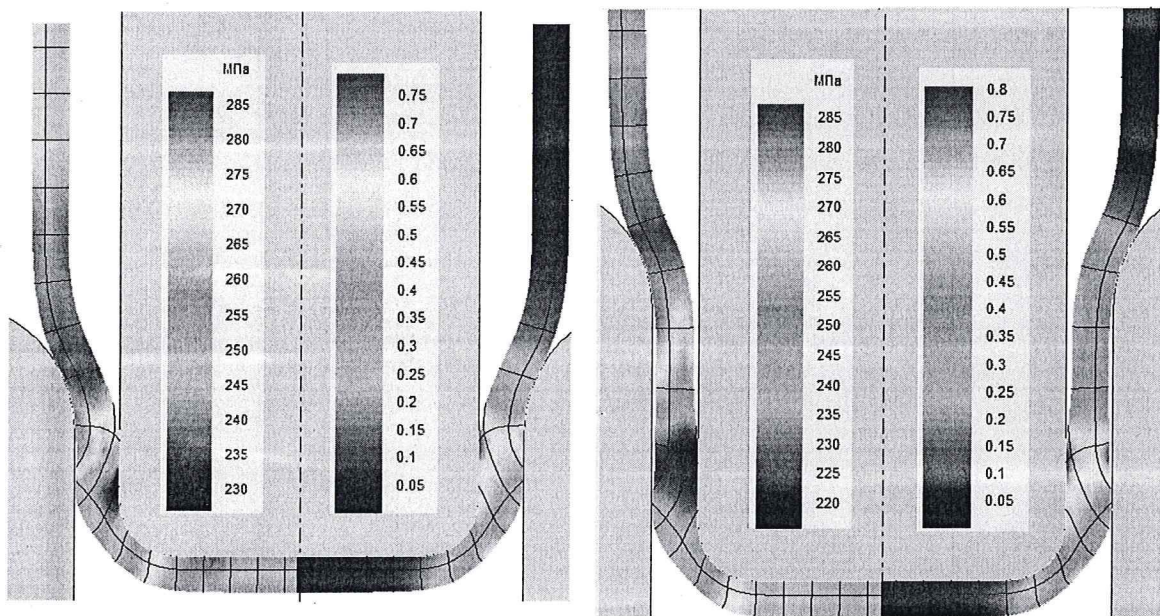


Рис. 4. Сопротивление деформации, МПа и распределение накопленных деформаций, лог. ед. по сечению заготовки при образовании уступа у дна стакана на переходе 3.

Для изучения воздействия вызванных накопленными деформациями напряжений на постоянство размеров заготовок экранов, на 10 образцах, измерены внешние их примерно через сутки после механической обработки, и через 45 суток после неё. Результаты измерений заготовки после отделения от штампованного стакана дна и проточки его в заготовку-трубку, показанную на рисунке 1, приведены в таблице 5.

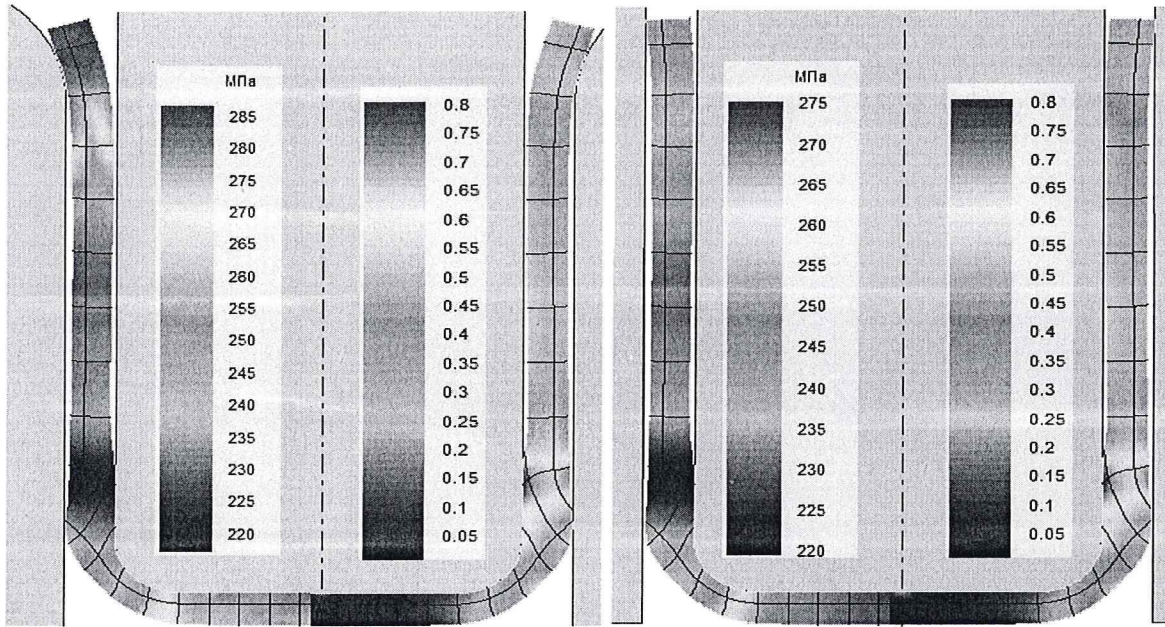


Рис. 5. Сопротивление деформации, МПа и распределение накопленных деформаций, лог. ед. по сечению заготовки на завершающих этапах вытяжки стакана на переходе 3.

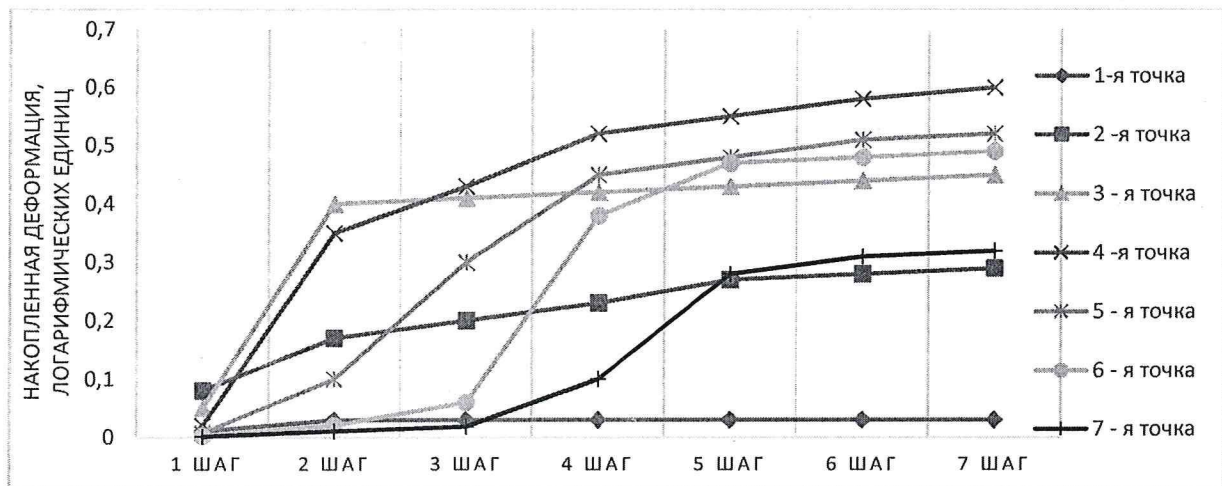


Рис. 6. Значения накопленных деформаций в контрольных точках по сечению заготовки стакана на переходе 1 вытяжки, логарифмических единиц.

Для исключения путаницы, все заготовки были необходимым образом размечены, в том числе были обозначены места расположения в исходных стаканах дна – «2 низ», и свободного торца – «верх». Как видно из таблицы, в среднем измерение диаметра нижнего торца в сторону его уменьшения составило 0,01 мм – в 8 случаях из 10, и в двух случаях – 0,02 мм. При этом изменение диаметра верхнего торца наблюдалось 4 случаях из 10, и также всегда вместе с уменьшением диаметра нижнего торца.

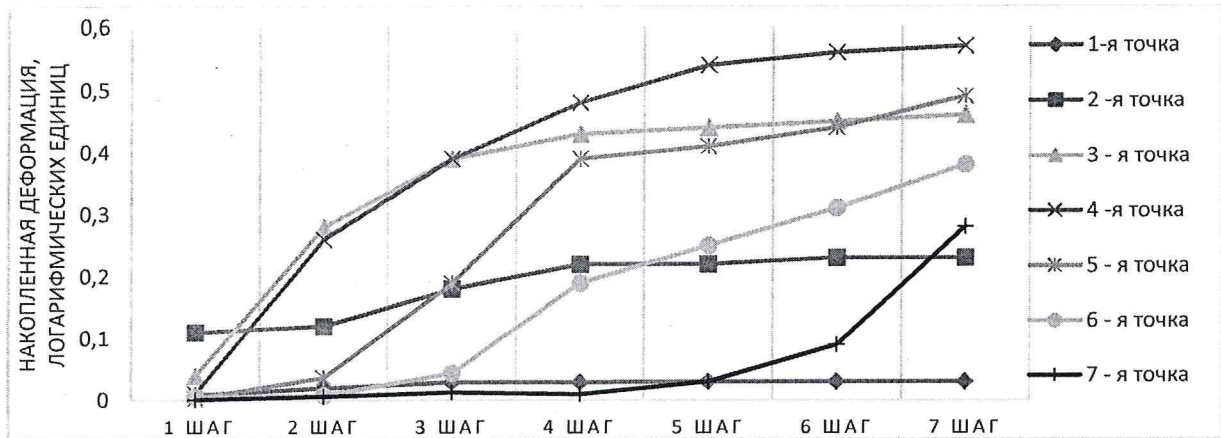


Рис. 7. Значения накопленных деформаций в контрольных точках по сечению заготовки стакана на переходе 2 вытяжки, логарифмических единиц.

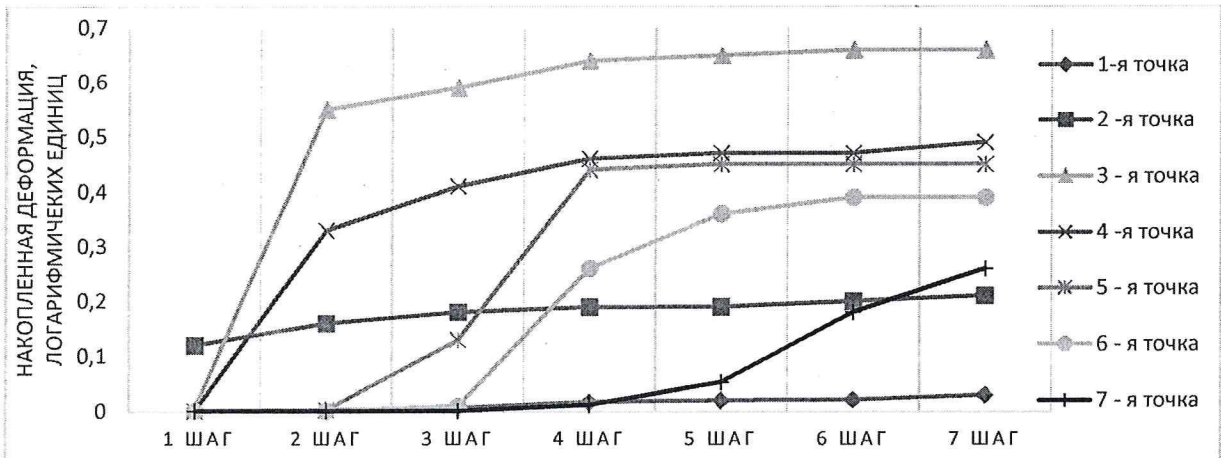


Рис. 8. Значения накопленных деформаций в контрольных точках по сечению заготовки стакана на переходе 3 вытяжки, логарифмических единиц.

Таблица 5.

Изменение диаметра заготовок – трубок в нижней и верхней части исходного стакана.

Дата измерения, номер детали	Ø, мм в верхней части детали	Ø, мм в нижней части детали	Дата измерения, номер детали	Ø, мм в верхней части детали	Ø, мм в нижней части детали	Разница в верхней части детали, мм	Разница в нижней части детали, мм
14.07.2021(1)	47,98	47,99	23.08.2021(1)	47,98	47,98	0	-0,01
14.07.2021(2)	47,99	47,99	23.08.2021(2)	47,98	47,98	-0,01	-0,01
14.07.2021(3)	47,99	47,99	23.08.2021(3)	47,98	47,98	0	-0,01
14.07.2021(4)	47,98	47,98	23.08.2021(4)	47,98	47,97	0	-0,01
14.07.2021(5)	47,98	47,99	23.08.2021(5)	47,96	47,97	-0,01	-0,02
14.07.2021(6)	47,98	47,99	23.08.2021(6)	47,98	47,98	0	-0,01
14.07.2021(7)	47,98	47,99	23.08.2021(7)	47,98	47,98	0	-0,01
14.07.2021(8)	47,98	47,98	23.08.2021(8)	47,98	47,97	0	-0,01
14.07.2021(9)	47,97	47,98	23.08.2021(9)	47,96	47,97	-0,01	-0,01
14.07.2021(10)	47,98	47,98	23.08.2021(10)	47,96	47,96	-0,01	-0,02

Ввиду того, что уменьшение контролируемого размера у верхнего торца во всех случаях наблюдалось у штамповок с выраженной неравномерностью фестонов, по-видимому, имеет место не уменьшение диаметра в чистом виде, а отклонение их формы от цилиндрической. Рассмотрим подробно возможные причины уменьшения диаметра нижнего торца трубки после отделения дна от штампованного стакана и его проточки.

На переходе 3 вытяжки имеет место значительное затруднение в деформации материала, расположенного в области контрольных точек 3 и 4 заготовок, как это видно на математической модели рисунков 4 и 5, и на графике рисунка 8. Образующаяся в начале третьего перехода вытяжки область пережима поступившей после второй вытяжки заготовки становится причиной резкого роста сопротивления материала заготовки деформированию, и скачкообразному увеличению накопленных деформаций, как это видно уже на математической модели рисунка 3.

Вид образовавшегося на третьем переходе вытяжки уступа в месте перехода скругления от дна стакана к его стенке, показан на рисунке 9. Интересно, что образование уступа на втором переходе вытяжки не происходит, поскольку разница диаметров заготовки после первого и второго перехода достаточно велика для того, чтобы подобного защемления материала не происходило. Оттого и сопротивление деформации в области точек 3 и 4 на переходе 2 растёт так быстро, а более плавно, как это видно в таблице 4, а также графиков на рисунках 7 и 8.

В процессе дальнейшей проточки трубок, автодеформация достигает примерно тех же значений – около 0,01...0,002 мм, в основном – у нижнего их торца. Учитывая толстостенность заготовок – трубок, имеющих толщину стенки около 4 мм при внешнем диаметре чуть меньше 48 мм, это указывает на очень высокий уровень напряжений в материале заготовок. Соответственно, при проверке точных размеров калибр-пробками, проходной калибр которых должен иметь разброс не более 8 мкм [6], такие отклонения выводят детали в брак. Исправление такого брака путём дополнительной механической обработки существенно замедляет и удорожает процесс производства, а кроме того, не снимает его причины – высокого уровня напряжений в материале заготовки.

Как показывает практика, для уменьшения этих напряжений до приемлемого уровня в соответствии с ГОСТ 14082 [2], необходимо проведение отжига по методике связанного с ним ГОСТ 14080 [7], который гарантирует заявляемые ГОСТ 14082 [2] свойства материала. Однако то, что поставка прутков и листов предусмотрена в состоянии без термической обработки, служит соблазном для «упрощения» отжига в части сокращения его длительности и проведения ускоренного охлаждения заготовок.

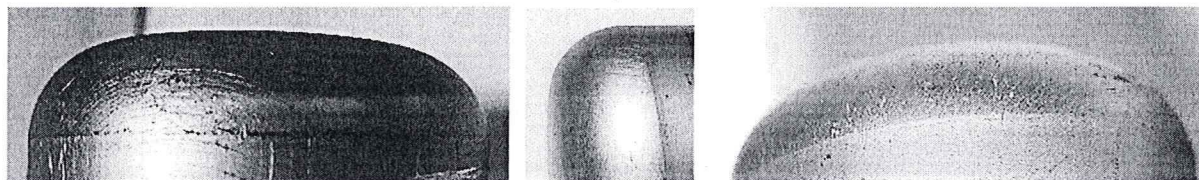


Рис. 9. Выступающий ободок у перехода скругления в стенку штампованного стакана.

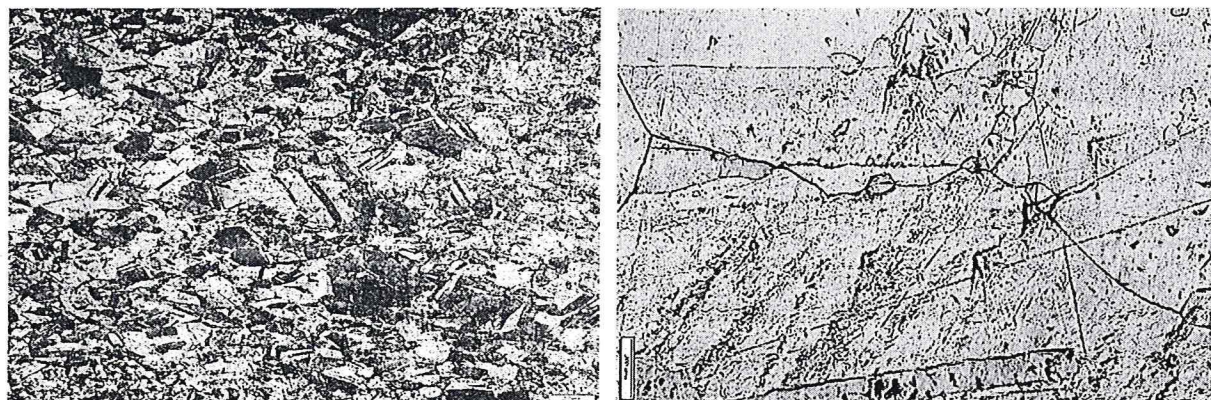


Рис. 10. Полученная по ГОСТ 17080 структура с характерными двойниками отжига (слева) и искажённая структура материала после «упрощённого» отжига (справа).

Таблица 6.

Термическая обработка по ГОСТ 14080 и «упрощённая».

Вариант отжига	Содержание обработки
ГОСТ 14080	Отжиг в водороде, вакууме или защитной атмосфере при температуре 960 ± 20 °С, выдержка 1 час, охлаждение с печью или контейнером до 200 °С со скоростью не более 10 °С в минуту.
«Упрощённый»	Отжиг в проходной водородной печи в оснастке типа «лодочка». Выдержка в предкамере при 730...740 °С 80...90 минут, отжиг в основной камере 825...875 °С в течении 20...30 минут, охлаждение в охлаждаемом водой холодильнике до 40...60 °С, далее на воздухе.

На рисунке 10 показаны структуры материала штампованной заготовки в области скругления между её стенкой и дном после отжига по требованиям ГОСТ 14080 [7], и после ускоренного отжига. Параметры термической обработки для первого и второго случая приведены в таблице 6. Из таблицы видно, что «упрощённый» отжиг проводится при пониженной температуре, и вдвое-втрое уменьшенное относительно нормативных требований время. При этом скорость охлаждения заготовок не только превышает предписанную, но и изменяется ступенчато, что приводит к подкаливанию материала и сводит на нет его выдержку при повышенной температуре. Как следствие, структура материала прошедших такую обработку заготовок не соответствует отожжённой.

В то время, как правильный отжиг вызывает образование полигонов-двойников и снятие напряжений, подкаленный материал представлен неправильной формы зёрнами с искажённой волнообразной субструктурой, как это видно на фотографиях рисунка 10. Эта волнистость является проявлением автодеформации материала на микроуровне, как части общей деформации деталей и их заготовок. То, что охлаждение заготовок может протекать неравномерно в рамках садки и каждой из них в отдельности, лишь усугубляет неоднородность их материала и уровень напряжений в нём.

Хотя ГОСТ 14082 [2] не предусматривает контроля термообработки прутков и листов методом измерения твёрдости, она хорошо отражает состояние материала. Измерение твёрдости материала заготовок по Виккерсу [8] показало, что после нормативного отжига она составила HV 148...150, а после «упрощённого» - HV 221...225. Это, значит, что отступление от ГОСТ 14082 в части термической обработки не допустимо, поскольку материал не избавляется в нужной степени от приобретённых напряжений.

Накопленные повреждения в материалах из сплава 29НК, не позволяют достичь заявленных в ГОСТ 14082 [2] свойств. В частности, близкая к линейной, за исключением точки перегиба [7], его дилатометрия, сильно искажается, выводя контролируемые размеры точных деталей за пределы допуска даже при их длительном нахождении в условиях обычных температур рабочих помещений, вне теплосмен. Понятно, что технологические или рабочие перепады температуры, а также вибрации, усилят и ускорят автодеформации, что может вывести из строя готовые электровакуумные приборы, где точность и постоянство размеров деталей напрямую определяет их работоспособность.

Кроме того, такой материал может отличаться пониженной трещиностойкостью, и разрушаться под воздействием напряжений, возникающих даже в ходе операций сварки [9] и пайки-сборки [10], и приводя к потере дорогостоящих узлов высокой степени готовности.

Выводы

1. Холодная пластическая деформация листовых заготовок из сплава 29НК-ВИ вызывает в их материале напряжения такого уровня, которого достаточно для вывода размеров точных деталей за пределы установленного к ним допуска. При этом отжиг, не учитывающий требования ГОСТ 14082 к замедленному охлаждению материала, не позволит стабилизировать размеры заготовок и готовых деталей.

2. Математическое моделирование процесса вытяжки из листа цилиндрических заготовок – стаканчиков позволило установить, что наиболее напряжённой их частью является место перехода скругления их дна в стенку цилиндра. Соответственно, после отделения дна стаканчика, изменение диаметра заготовок в этом месте наибольшее, и проявляется даже через несколько операций механической обработки.

3. Критерием достаточности проведённого отжига в части снятия приобретённых материалом заготовок напряжений может служить его металлографическая структура с наличием большого числа двойников отжига, а также твёрдость материала, которая не должна превышать HV 148...150. Поскольку такая информация не приведена в ГОСТ 14082, она может быть полезна, в том числе, для оценки соответствия поставляемого материала заявленным в стандарте данным.

4. Для того, чтобы материал заготовок и деталей из прецизионного сплава 29НК-ВИ соответствовал своему назначению, они должны проходить отжиг по приведённому в ГОСТ 14082 режиму. Без этого его использование в точных деталях и узлах может привести к их автодеформации и изменению размеров, как следствие – изменению рабочих характеристик готовых электровакуумных приборов.

Библиографический список

1. ГОСТ 10994-74 Сплавы прецизионные. Марки / –М.: Издательство стандартов, 1978. -17 с., изм.

2. ГОСТ 14082-78 Прутки и листы из прецизионных сплавов с заданным температурным коэффициентом линейного расширения. Технические условия / –М.: Издательство стандартов, 1978. -7 с., изм.

3. Физические величины. Справочник / Коллектив авторов по ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова / –М.: Энергоатомиздат, 1991, -1231 с.; ил.

4. В.П. Романовский В.П. / Справочник по холодной штамповке / издание 5-е, дополненное и переработанное / –Л.: Машиностроение, 1971. -782 с.

5. Галкин В.И., Головкин П.А. / Особенности деформации при осадке заготовок из титанового сплава BT20 / –М.: Технология машиностроения, 2022, № 8, с. 13...18.

6. ГОСТ 24851-81 Калибры гладкие для цилиндрических отверстий и валов. Виды / –М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. -6 с.

7. ГОСТ 14080-78 Лента из прецизионных сплавов с заданным температурным коэффициентом линейного расширения. Технические условия / –М.: Издательство стандартов, 1978. -9 с., изм.

8. ГОСТ 2999-75 Металлы и сплавы. Метод измерения твёрдости по Виккерсу / – М.: Издательство стандартов, 1987. -30 с.; изм.

9. Головкин П.А. / О связи трещинообразования в зоне сварных швов с термической обработкой деталей из сплава 29НК-ВИ / –М.: Сварочное производство, № 2, 2023, с. 53...55.

10. Головкин П.А. / О связи износа токарного инструмента и разрушения материала деталей из сплава 29НК-ВИ при сборке-пайке узлов электровакуумных приборов / –М.: ООО «НАКС Медиа», Сварка и диагностика, № 6, 2022, с. 49...51.