НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ МГТУ ИМ. Н. Э. БАУМАНА
НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ
Эл № ФС77 - 48211. Государственная регистрация №0421200025. ISSN 1994-0408
электронный научно-технический журнал

Оценка величины пружинения сферических облицовок при калибровке на обжим жидкостью

 # 10, октябрь 2012
DOI: 10.7463/1012.0469199

Софьин А. С., Баскаков В. Д., Тарасов В. А.

УДК 621.7.043

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана
anton_s03@list.ru
baskakov_vd@mail.ru
m12@sm.bmstu.ru

Введение

Высокоточные облицовки сферической формы широко применяются в современных системах вооружений, ракетно-космической технике и других областях машиностроения.

Типовая технология получения таких облицовок включает операцию калибровки внутренней поверхности данной детали, позволяет обеспечить точность формы и, в дальнейшем, при механической обработке снизить ее разностенность [1]. Наиболее распространенным способом проведения такой операции является деформирование детали за счет внешнего гидростатического давления P до полного соприкосновения ее внутренней поверхности, имеющей в начале операции радиус $R_з$, высоту H и толщину δ, с поверхностью матрицы радиусом $R_м$ (рис. 1). При этом $R_з > R_м$. В качестве сред, передающих внешнее воздействие, могут выступать жидкости, резины, эластичные пластики типа полиуретанов, достоинством применения которых является равномерное распределение давления нагружения по поверхностям контакта с калибруемой деталью [2].

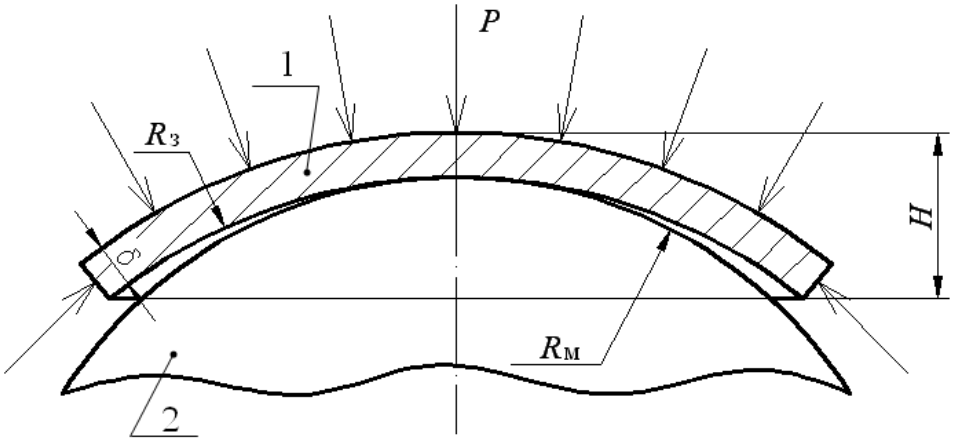


Рис. 1. Схема проведения калибровки

1 – калибруемая сферическая облицовка; 2 – сферическая матрица

Эффект пружинения детали, возникающий после снятия внешнего воздействия, затрудняет проектирование технологического процесса изготовления изделий и требует проведения мероприятий по его компенсации. В связи с этим, с целью минимизации затрат времени и материальных ресурсов на определение параметров и режимов проведения калибровки могут быть использованы различные методы априорных оценок величины пружинения. В большинстве из них используется математическое моделирование для определения параметров проведения процессов штамповки и калибровки. Допущения, принятые в подобных методиках, зачастую несут в себе серьезные ограничения в их применимости. Например, методики [3-5] могут быть успешно использованы только для оценки величины пружинения деталей простой формы (пластин, втулок, сферических облицовок). Более того, использование безмоментной теории оболочек не позволяет применять данные модели к деталям, толщиной которых нельзя пренебречь, таким, например, как сферическая облицовка, рассматриваемая в настоящей статье.

В работе [6] показано, что применение современных конечно-элементных систем моделирования позволяет с удовлетворительной точностью оценивать величину пружинения откалиброванных деталей сложной конфигурации и значительной толщины. Однако широкий круг охвата различных инженерных задач, универсальная направленность современных систем конечно-элементного моделирования порождают ряд существенных особенностей, связанных с их применением на практике. Данные особенности заключаются в использовании ресурсоемких алгоритмов проведения расчетов, в относительной сложности освоения конечным пользователем, а также в

высокой стоимости таких систем. При проектировании технологических процессов наиболее предпочтительным является использование упрощенных инженерных подходов для определения оптимальных режимов и условий проведения составляющих эти процессы операций.

Задачами данной работы являются анализ напряженно-деформированного состояния, а также получение аналитических выражений для оценки величины пружинения толстостенных облицовок сферической формы при калибровке жидкими и эластичными средами. Поиск зависимостей осуществлялся путем обработки ряда численных расчетов процессов калибровки, выполненных с использованием метода конечных элементов, средствами множественного регрессионного анализа.

Численное моделирование калибровки облицовки сферической формы и анализ полученных результатов

При построении расчетной модели калибровки облицовок сферической формы были использованы допущения и предположения, хорошо зарекомендовавшие себя [6]:

1) для моделирования использовался метод неявного анализа (*h*-метод) и программная среда ANSYS APDL [7];

2) принимая во внимание тот факт, что деталь и матрица имеют единую ось симметрии, при моделировании рассматривалась четверть этих объектов;

3) для разбиения детали использовался конечный элемент Solid 186 [7];

4) матрица моделировалась абсолютно жесткой поверхностью;

5) давление жидкости равномерно распределялось по внешней и торцевой поверхности детали (рис. 1);

6) изменение давления P происходило по закону, представленному на рис. 2;

7) трение поверхностей калибруемой детали и матрицы не учитывалось;

8) в детали отсутствовали начальные напряжения (калибровка после отжига);

9) в качестве модели материала облицовки использовалась билинейная зависимость интенсивности напряжений σ_i и деформаций ε_i с кинематическим упрочнением (рис. 3).

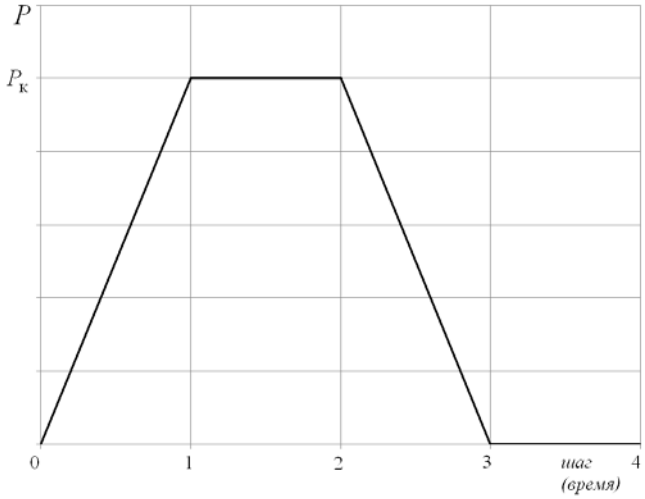


Рис. 2 Характер изменения давления *P* в процессе моделирования калибровки

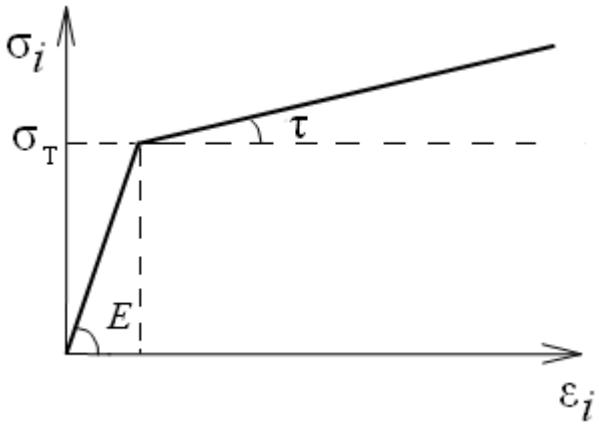


Рис. 3. Билинейная модель поведения материала

E – модуль Юнга; $\sigma_т$ - предел текучести; τ - модуль упрочнения

Пружинение детали П определялось как модуль вектора перемещения точек, принадлежащей внутренней поверхности детали, после разгрузки, что соответствует максимальной деформации детали вследствие упругого пружинения (рис. 4).

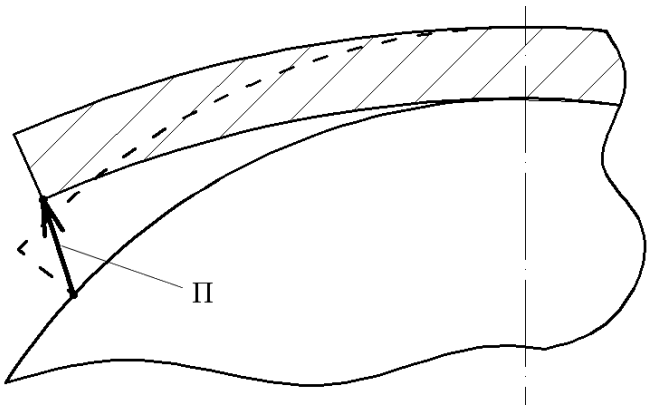


Рис. 4. Перемещение облицовки в процессе разгрузки.

П – величина пружинения

При проведении расчетов пропорции геометрических параметров облицовки были подобраны в соответствии с характеристиками типовых деталей, применяемых на практике: материал – сталь Ст3; калибровка на обжим проводилась в матрицу $R_м$ = 52 мм; максимум давления воздействия $P_к$ = 80 МПа; начальный радиус облицовки $R_з$ = 57,2 мм; толщина облицовки δ = 2,1 мм.

Подтверждением корректности использования симметрии задачи с целью минимизации расчетов, а также правильности выбора граничных условий служит осесимметричное распределение модуля вектора перемещения узлов детали r (5). В целом, аналогичную картину демонстрирует и распределение интенсивностей напряжений σ_i на различных стадиях калибровки (рис. 6). Необходимо отметить неравномерность напряжений в меридиональном направлении, что объясняется наличием внешнего воздействия на торцевую поверхность облицовки.

Как видно из рисунка а, очаги пластических деформаций в соответствии с условием начала пластичности Хубера – Мизеса [8] на стадии нагружения возникают в основании детали, а также средней ее части, прилегающей к матрице. Однородность интенсивностей напряжения σ_i по толщине у основания облицовки на стадии нагружения объясняется наличием действующего на торец давления. При этом разгрузка основания происходит неравномерно по толщине – наиболее интенсивно напряжения снижаются у поверхности, к которой прикладывается внешнее воздействие (рис. 6б). Наименее всего подвергается разгрузке пограничная с матрицей область детали (внутренняя поверхность). Так, например, в средней части облицовки интенсивности остаточных напряжений $\sigma_i^{ост}$ принимают значения близкие к пределу текучести материала σ_T = 235 МПа. Графики (рис. 7) демонстрируют изменение интенсивности

напряжений σ_i в узлах 1, 2, 3 модели, лежащих в меридиональном сечении детали (6б), на стадиях стационарного нагружения и разгрузки.

Из графиков 7 видно, что узлы 1 и 2 деформируются упруго, однако после снятия внешнего воздействия напряжения в них не разгружаются полностью. Причиной тому является влияние пластически деформированных частей облицовки.

Высокие остаточные напряжения могут приводить к ухудшению эксплуатационных характеристик детали и изделия в целом. Для снижения остаточных напряжений после калибровки в ряде случаев целесообразно применять операцию отжига.

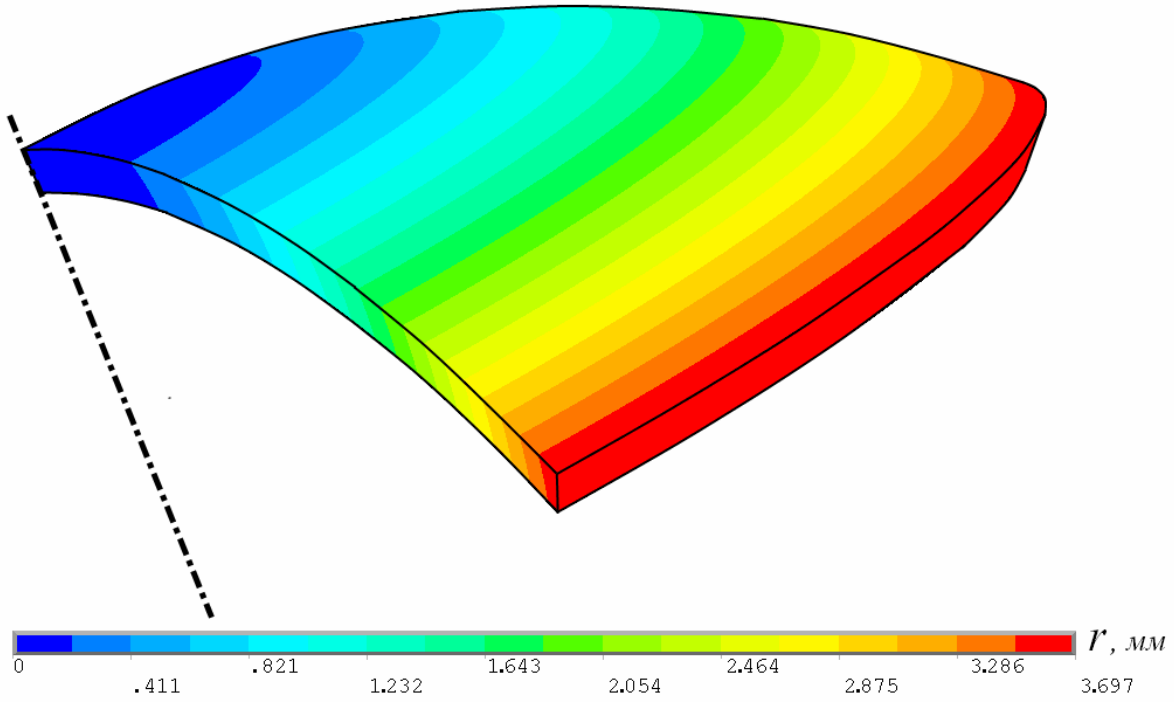
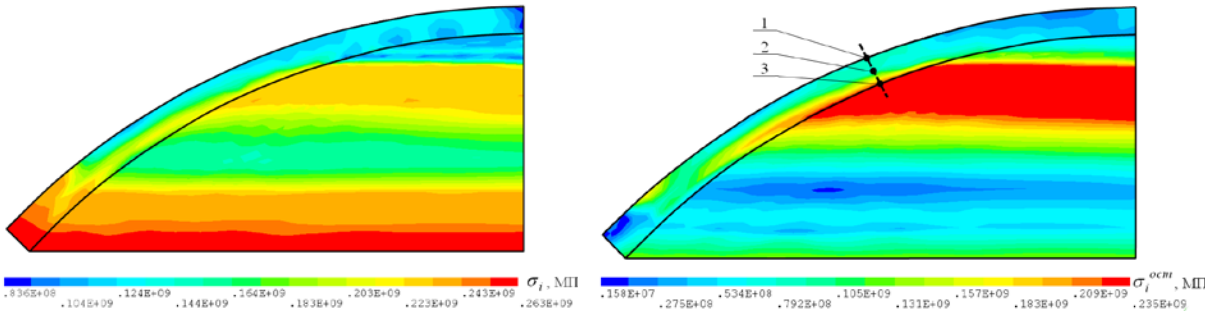


Рис. 5. Модуль вектора перемещения узлов облицовки *r* в конечный момент времени



а) б)

Рис. 6. Интенсивность напряжений σ_i на стадии стационарного нагружения (а), остаточных напряжений $\sigma_i^{ост}$ (б) облицовки

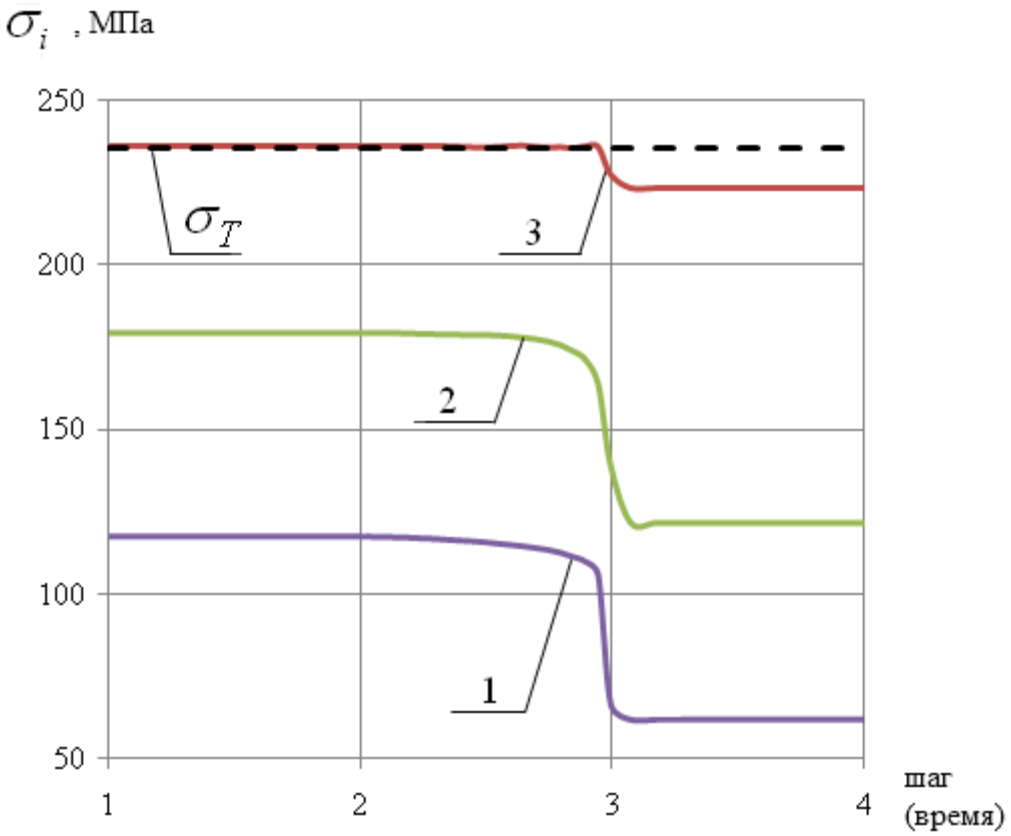


Рис. 7. Изменение интенсивности напряжений σ_i в процессе калибровки в узлах 1, 2, 3, изображенных на рис. 6б

Построение аналитических выражений для оценки пружинения облицовок сферической формы

В качестве величин, оказывающих решающее влияние на результат калибровки, были выбраны следующие факторы (число факторов p=4): начальный радиус $R_з$,

начальная толщина δ, начальная высота H облицовки, максимальное давление нагружения при калибровке $P_к$.

Предполагая, что зависимость между факторами и величиной пружинения является линейной, для построения искомых аналитических выражений был использован метод множественного регрессионного анализа [9]. В соответствии с планом полного факторного эксперимента каждый фактор принимал два значения. Таким образом, для построения связи проводилось $n = 2^p = 16$ численных расчетов, выполняемых с учетом вышеприведенного подхода. В рамках одного плана параметры материала детали принимались неизменными.

Значения факторов, представленные ниже в безразмерном виде, выбирались в соответствии с диапазоном изменения конструктивных параметров штатных изделий: радиус $\overline{R}_{зi} = \frac{R_{зi}}{R_м} = (1{,}1;\ 1{,}3)$, толщина $\overline{\delta}_{зi} = \frac{\delta_i}{R_м} = (0{,}04; 0{,}07)$, высота $\overline{H}_i = \frac{H_i}{R_м} = (0{,}15;\ 0{,}30)$ облицовки; величина максимальной внешней нагрузки $\overline{P}_{кi} = \frac{P_{кi}}{\sigma_т} = (\overline{P}_{min}; 1.5)$, где $\overline{P}_{min}$ - величина обезразмеренного минимального давления, необходимого для закрытия зазора между матрицей и облицовкой.

Расчеты величины пружинения проводились для детали, выполненной из меди марки М1 и стали Ст3 (таблица 1).

Таблица 1

Исходные данные и результаты численных расчетов

Матрица планирования численных расчетов						**Результаты расчетов**	
j	1	2	3	4		Пружинение $\overline{\Pi}_i \cdot 10^{-3}$,	
i	Радиус облицовки $\overline{R}_{зi}$	Толщина облицовки $\overline{\delta}_i$	Высота облицовки $\overline{H}_i$	Давление $\overline{P}_{кi}$		Ст3	М1
				Ст3	М1		
1	1,1	0,04	0,15	0,34	0,33	2,75	2,50
2	1,3	0,04	0,15	0,34	0,33	2,10	1,90
3	1,1	0,07	0,15	0,34	0,33	2,15	1,94
4	1,3	0,07	0,15	0,34	0,33	1,81	1,56
5	1,1	0,04	0,30	0,34	0,33	2,75	2,42
6	1,3	0,04	0,30	0,34	0,33	2,25	1,90
7	1,1	0,07	0,30	0,34	0,33	2,54	2,33
8	1,3	0,07	0,30	0,34	0,33	2,19	1,90

9	1,1	0,04	0,15	1,50	1,50	2,79	2,52
10	1,3	0,04	0,15	1,50	1,50	2,06	1,75
11	1,1	0,07	0,15	1,50	1,50	2,19	1,92
12	1,3	0,07	0,15	1,50	1,50	1,54	1,23
13	1,1	0,04	0,30	1,50	1,50	2,79	2,44
14	1,3	0,04	0,30	1,50	1,50	2,08	1,98
15	1,1	0,07	0,30	1,50	1,50	2,56	2,29
16	1,3	0,07	0,30	1,50	1,50	1,88	1,54

На основе приведенных данных (таблица 1) установлена зависимость между начальными параметрами задач (факторами) и величинами упругого пружинения детали $\overline{\Pi}_i$, используя предположение, что искомая связь описывается линейным многочленом вида

$$\overline{\Pi} = \overline{a}_0 + \sum_{j=1}^{p} \overline{a}_j \overline{x}_j , \qquad (1)$$

где p - число факторов калибровки (p = 4), $\overline{a}_0$ - безразмерная постоянная составляющая пружинения, $\overline{a}_j$ - безразмерные коэффициенты влияния j-ого фактора на величину пружинения, $\overline{x}_j$ - безразмерное значение j-ого фактора.

Значения коэффициентов выражения вида (1) для деталей из стали Ст3 и меди М1, найденные с использованием линейного множественного регрессионного анализа, приведены в таблице 2.

Таблица 2

Значения коэффициентов уравнения регрессии

j	Коэффициент влияния	Материал	
		Ст3	М1
	постоянная составляющая $\overline{a}_0$	$6{,}13 \cdot 10^{-3}$	$5{,}88 \cdot 10^{-3}$
1	радиуса облицовки $\overline{R}_з$	$-2{,}90 \cdot 10^{-3}$	$-2{,}90 \cdot 10^{-3}$
2	толщины облицовки $\overline{\delta}$	$-0{,}011$	$-0{,}011$
3	высоты облицовки $\overline{H}$	$1{,}35 \cdot 10^{-3}$	$1{,}35 \cdot 10^{-3}$
4	максимального давления $\overline{P}_{кi}$	$-7{,}44 \cdot 10^{-5}$	$-8{,}57 \cdot 10^{-5}$

Теснота связи между результатами наблюдений и оценками, проведенными по полученным выражениям, была установлена путем вычисления коэффициента множественной корреляции *R*. Величина *R* для деталей, выполненных из меди марки М1, составила 0,92, для стальных облицовок – 0,93. Значимость коэффициента множественной корреляции была также оценена при помощи *F*-критерия Фишера для уровня значимости 0,01. Связь считают статистически значимой в том случае, если расчетное значение $\hat{F}_R^{\text{М1}} = 16{,}45$, $\hat{F}_R^{\text{Ст3}} = 18{,}61$ превышает табличное $F_{0{,}01;11;4} = 14{,}45$ [9].

Аналогично по *t*-критерию Стьюдента для уровня значимости 0,01: $\hat{t}_R^{\text{М1}} = 21{,}43$, $\hat{t}_R^{\text{Ст3}} = 24{,}05$ являются величинами большими значения, полученного из таблицы $t_{0{,}99;11} = 3{,}11$ [9].

Близкие к единице значения коэффициента множественной корреляции *R*, а также широкий доверительный интервал подтверждают гипотезу о линейном характере зависимости величины пружинения от выбранных факторов в заданном диапазоне их варьирования.

Полученные линейные выражения позволяют провести оценку пружинения детали типа сферическая облицовка (рис. 1), величина прикладываемого внешнего воздействия, а также размеры, которой лежат в диапазоне варьирования выбранных факторов калибровки.

Оценка пружинения с использованием выражения (1) может осуществляться для различных значений радиуса матрицы $R_{\text{м}}$, что подтверждается численными расчетами. Было выполнено моделирование процесса калибровки по варианту *i*=2 (таблица 1) с размерами, увеличенными в два раза (в том, числе и радиус матрицы). Давление нагружения $P_{\text{к}}$ подбиралось как минимально необходимое для полного закрытия зазора между матрицей и облицовкой и составило 85 МПа. В качестве материала была использована сталь Ст3. Полученная величина пружинения 0,225 мм оказалась близка к значению 0,218 мм, оцененному по линейной зависимости (1).

Анализ полученных выражений для оценки пружинения

Характер воздействия факторов на величину пружинения определяется знаком коэффициентов влияния a_j. Отрицательная величина коэффициентов влияния радиуса, толщины детали, а также прикладываемого давления говорит о том, что данные факторы стремятся снизить пружинение. Сходность знаков коэффициентов уравнений регрессии и значений коэффициентов геометрических факторов, полученных для облицовок,

выполненных из стали Ст3 и сплава М1, подтверждает индифферентность характера их влияния к материалу образцов.

При помощи полученных зависимостей были установлены относительные значения вкладов, которые вносят факторы в переменную часть уравнения регрессии (рис. 8Р). Диаграмма вкладов построена для величин факторов, указанных в пункте *i*=13 матрицы планирования (таблица 1).

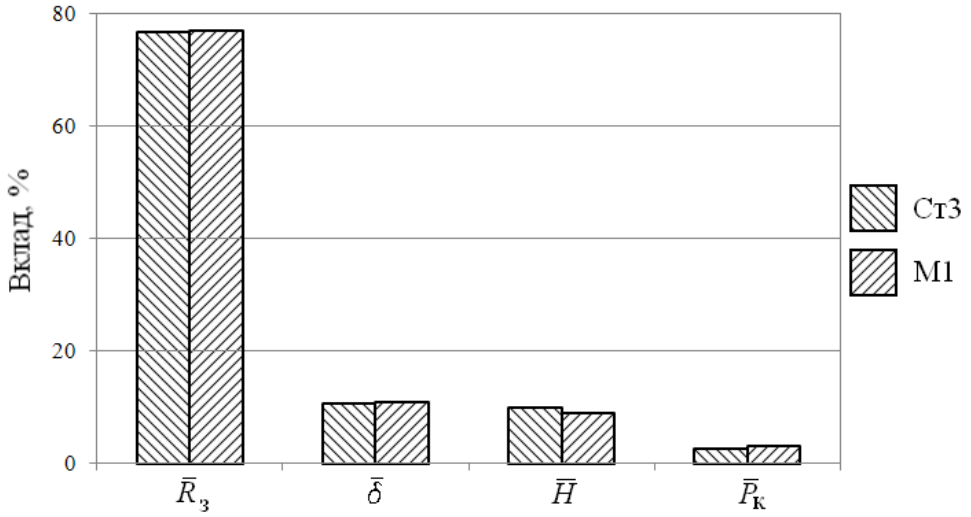


Рис. 8 Диаграмма вкладов факторов в переменную составляющую уравнения регрессии

Диаграмма демонстрирует качественное совпадение распределения вкладов факторов для медной и стальной облицовок. Наибольшее возмущение в пружинение вносит начальный радиус $\overline{R_{зi}}$, далее, в порядке убывания следует толщина $\overline{\delta}$ и высота $\overline{H}$ детали. Наименьший вклад оказывает давление нагружения $\overline{P_к}$.

На основе приведенной диаграммы вкладов, а также значений коэффициентов влияния, можно сделать вывод о том, что для уменьшения величины пружинения необходимо калибровать облицовки с бóльшим припуском на механообработку (с бóльшим радиусом сферической поверхности и толщиной). Повышение величины максимального давления калибровки приводит к незначительному уменьшению пружинения. Исходя из этого, данной параметр рекомендуется принимать минимально необходимым для полного закрытия зазора между матрицей и деталью, что согласуется с общепринятой практикой.

Анализ полученных выражений вида (1) показал, что устранение пружинения за счет выбора размеров облицовки и усилия воздействия не представляется целесообразным:

1) увеличение радиуса $\overline{R}_{зi}$ и толщины $\overline{\delta}$ детали повышает трудоемкость последующих операций механообработки, а также ведет к неэффективному использованию материала;

2) увеличение давления $\overline{P}_{к}$ при калибровке приводит к сравнительно небольшому изменению пружинения детали и к тому же имеет свои пределы.

Необходимо отметить, что в условиях реального производства пружинение является случайной величиной вследствие действия сил технологической природы, которая характеризуется полем рассеяния относительно номинальной величины. В отличие от номинального значения пружинения $\overline{\Pi}$, являющегося функцией режимов проведения калибровки, его случайная составляющая $\Delta\overline{\Pi}$ представляет собой объективную характеристику технологического оснащения и не может быть скомпенсирована без существенного вмешательства в технологический процесс.

Получим выражение для оценки $\Delta\overline{\Pi}$ как полный дифференциал $\overline{\Pi}$, считая факторы независимыми величинами, и запишем выражение в приращениях [10]

$$\Delta\overline{\Pi} = |a_1|\Delta\overline{R}_{з} + |a_2|\Delta\overline{\delta} + |a_3|\Delta\overline{H} + |\overline{a}_4|\Delta\overline{P}_{к}, \qquad (2)$$

где $\Delta\overline{R}_{з}$, $\Delta\overline{\delta}$, $\Delta\overline{H}$, $\Delta\overline{P}_{к} > 0$.

Таким образом, для оценки рассеяния величины пружинения необходимо определить диапазоны колебания факторов, которые могут быть получены по результатам измерений партии деталей перед калибровкой, а также из паспортных данных прессового оборудования. При помощи выражения (2) может быть решена и обратная задача: нахождение оптимальных значений допусков на поля рассеяния факторов по заданной величине $\Delta\overline{\Pi}$, которая, по сути, является допуском на отклонение формы сферической поверхности облицовки.

Выводы

1) Численными расчетами нагрузки и последующей разгрузки детали типа сферическая облицовка при калибровке установлено наличие значительных остаточных напряжений в ее материале.

2) На основе численных расчетов получены уравнения линейной регрессии для оценки пружинения деталей типа сферическая облицовка, выполненных из Ст3 и М1.

3) Анализ полученных соотношений показал, что для деталей типа сферическая облицовка:

а) наибольшее влияние на величину пружинения оказывает радиус облицовки $\overline{R}_{3i}$;

б) добиться полного отсутствия пружинения, изменяя значения параметров деталей и величины прикладываемого давления, не удается;

в) величину внешнего воздействия при калибровке на обжим рационально принимать минимально необходимой для полного закрытия начального зазора между облицовкой и матрицей.

Список литературы

1. Тарасов В.А., Баскаков В.Д., Круглов П.В. Методика проектирования технологии изготовления высокоточных деталей боеприпасов // Оборонная техника. - 2000. - № 1-2. - С. 89-92.
2. Исаченков Е.И. Штамповка резиной и жидкостью. – М.: Машиностроение, 1967. – 367 с.
3. Тарасов В.А., Боярская Р.В., Филимонов А.С. Взрывная калибровка сложнопрофильных тонкостенных оболочек // Вещества, материалы и конструкции при интенсивных динамических воздействиях. Труды международной конференции V Харитоновские тематические научные чтения. – 2003. – С. 510-514.
4. Чумадин А.С. Решение пластических и упругих задач листовой штамповки // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. Специальный выпуск. – 2010. – С. 11-15.
5. Анучин М.А., Полушин А.Г. Остаточные напряжения после сжатия предварительно напряженной пластины // Известия высших учебных заведений. Машиностроение.- 1978.- № 1.- С. 122-127.
6. Софьин А.С., Стрижков А.В., Ульвис Н.В., Зарубина О. В., Боярская Р. В. Численное моделирование процесса калибровки осесимметричных деталей жидкой технологической средой // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн.– 2012. – № 4. – Режим доступа: http://technomag.edu.ru/doc/361706.html (дата обращения 06.10.2012).
7. Mechanical APDL. ANSYS 13 Help system. [Electronic data and program] / ANSYS, Inc. —Canonsburg (PA), 2010.
8. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести: учебник для студентов вузов.- 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.

9. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул: учеб. пособие для втузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1988. – 239 с.
10. Тарасов В.А., Кашуба Л.А. Теоретические основы технологии ракетостроения.– М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 352 с.
8. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. Учебник для студентов вузов. Изд. 2-е перераб. и доп. М., Машиностроение. – 1975. – 400 с.
9. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул: Учеб. пособие для втузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш.шк., 1988. – 239 с.: ил.
10. Теоретические основы технологии ракетостроения / В.А. Тарасов, Л.А. Кашуба.– М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 352 с.

SCIENTIFIC PERIODICAL OF THE BAUMAN MSTU
SCIENCE and EDUCATION
EL № FS77 - 48211. №0421200025. ISSN 1994-0408
electronic scientific and technical journal

Estimate of springing spherical lining on squeezing with fluid during calibration

10, October 2012
DOI: 10.7463/1012.0469199

Sof'in A.S., Baskakov V.D., Tarasov V.A.

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана
anton_s03@list.ru
baskakov_vd@mail.ru
m12@sm.bmstu.ru

The authors propose a method of creating analytical relationships to estimate springing of parts after calibration with fluid or with flexible media. The authors obtained formulas for estimation of nominal and random components of springing for facing spherical shape based on results of numerical simulations. The authors show principles of the process and give recommendations on the choice of conditions for calibration.

Publications with keywords:FEM, springback, calibration by liquid and elastic environments, spherical liner
Publications with words:FEM, springback, calibration by liquid and elastic environments, spherical liner

References

1. Tarasov V.A., Baskakov V.D., Kruglov P.V. Metodika proektirovaniia tekhnologii izgotovleniia vysokotochnykh detalei boepripasov [The method of design of manufacturing technology of high-precision parts of ammunition]. *Oboronnaia tekhnika*, 2000, no. 1-2, pp. 89-92.

2. Isachenkov E.I. *Shtampovka rezinoi i zhidkost'iu* [Stamping by the use of rubber and liquid]. Moscow, Mashinostroenie, 1967. 367 p.

3. Tarasov V.A., Boiarskaia R.V., Filimonov A.S. Vzryvnaia kalibrovka slozhnoprofil'nykh tonkostennykh obolochek [Blasting calibration of complex-profile thin-walled shells]. *Veshchestva, materialy i konstruktsii pri intensivnykh dinamicheskikh vozdeistviiakh. Trudy mezhdunarodnoi konferentsii 5 Kharitonovskie tematicheskie nauchnye chteniia* [Extreme States of Matter. Detonation. Shock waves. 5th Kharitonov Thematic Scientific Reading. Proc. Int. Conf.]. Sarov, 2003, pp. 510-514.

4. Chumadin A.S. Reshenie plasticheskikh i uprugikh zadach listovoi *shtampovki* [The decision of plastic and elastic problems stamping]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*, 2010, spec. iss., pp. 11-15.

5. Anuchin M.A., Polushin A.G. Ostatochnye napriazheniia posle szhatiia predvaritel'no napriazhennoi plastiny [Residual stresses after the compression of pre-stressed plate]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie* [Bulletin of the Universities. Mechanical Engineering], 1978, no. 1, pp. 122-127.

6. Sof'in A.S., Strizhkov A.V., Ul'vis N.V., Zarubina O. V., Boiarskaia R. V. Chislennoe modelirovanie protsessa kalibrovki osesimmetrichnykh detalei zhidkoi tekhnologicheskoi sredoi [Numeric simulation of axial-symmetric machine parts calibration with technological liquid]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2012, no. 4. Available at: http://technomag.edu.ru/doc/361706.html , accessed 06.10.2012.

7. *Mechanical APDL. ANSYS 13 Help system. Electronic data and program*. ANSYS, Inc., Canonsburg (PA), 2010.

8. MalininN.N. *Prikladnaia teoriia plastichnosti i polzuchesti* [Applied theory of plasticity and creep]. Moscow, Mashinostroenie, 1975. 400 p.

9. L'vovskii E.N. *Statisticheskie metody postroeniia empiricheskikh formul* [Statistical methods for constructing of empirical formulas]. Moscow, Vysshaia shkola, 1988. 239 p.

10. Tarasov V.A., Kashuba L.A. *Teoreticheskie osnovy tekhnologii raketostroeniia* [Theoretical basis of rocket technologies].Moscow, Bauman MSTU Publ., 2006. 352 p.