

эффектов, степени и скорости деформации.

3. Реализация данной методики позволяет определить напряженно-деформированное состояние исследуемой области с учетом истории нагружения, степени и скорости деформации, нестационарного температурного поля и наличия тепловых источников, т.е. получить решение поставленной в [1] краевой задачи.

Литература

1. Пыжов В.В, Шлыкова А.В. Определение напряженно-деформированного состояния пластически деформируемого тела применительно к процессам полугорячего прямого выдавливания и редуцирования в конические матрицы. / Известия МГТУ «МАМИ» №1(15), 2013, т2.
2. Пространственные задачи термопластичности. / Шевченко Ю.Н. и др. - Киев: Наукова думка, 1980. 264 с.

Анализ способов расчета пружинения листовых материалов

Сапрыкин Б.Ю.

Университет машиностроения

kiod@mami.ru

Аннотация. Статья посвящена обзору научной литературы по проблеме пружинения. В нем представлены работы, посвященные анализу и теоретическому обоснованию пружинения. Представлены классические методы расчета пружинения, которые используются при его прогнозировании. Приводятся также и современные работы, посвященные проблеме пружинения, математический анализ, экспериментальные исследования, в том числе посвященные пружинению многослойных материалов.

Ключевые слова: Изгиб листа, пружинение, остаточные напряжения, многослойные материалы, изгибающий момент

При изготовлении деталей методом гибки возникает проблема, связанная с изменением угла и радиуса готовой детали. После снятия нагрузки угол изогнутой детали изменяется по сравнению с углом инструмента из-за упругой энергии, запасенной в процессе гибки (остаточные напряжения). Этот процесс можно назвать упругим пружинением, или просто пружинением. При этом изменяется угол и радиус кривизны образца. Остаточные напряжения после разгрузки получены для участка с пластической деформацией и их можно представить как [1]:

$$\sigma_0 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_T \left(1 - \frac{3y}{s} \right)$$

где: σ_T - предел текучести

s - толщина образца,

y - расстояние между нейтральным слоем и радиусом гибки.

Пружинение можно представить в виде соотношения радиусов [1]:

$$\Delta r = \frac{r}{r'}$$

или разницы между углами [2]

$$\Delta \alpha = \alpha' - \alpha$$

где: r - заданный радиус,

r' - радиус детали,

$\Delta \alpha$ - угол пружинения,

α - угол гiba,

α' - угол образца после разгрузки.

Анализ процесса гибки и пружинения проводился многими учеными как российскими, так и зарубежными: Губкиным С.И., Горбуновым М.Н., Ершовым В.И., Зубцова М. Е., Исаченковым Е.И., Калпиным Ю.Г., Лысовым М.И., Малининым Н.Н., Матвеевым А.Д., Мошными Е.Н., Бондарем В.С., Поповым Е.А., Смирновым-Аляевым Г.А., Томленовым А.Д. и многими другими.

Основные (классические) работы, посвященные изгибу и пружинению.

Процессам изгиба и пружинения посвящены работы многих известных ученых. В этих работах были заложены теоретические обоснования появления пружинения. В большинстве работ идеализирована схема нагружения и напряженно-деформированное состояние, возникающего в ходе процесса изгиба.

Одной из самых применяемых зависимостей для теоретического определения угла пружинения является упрощенная формула В.П.Романовского [2]:

Для V-образной свободной гибки :

$$\tan \Delta\alpha = 0,375 \frac{l}{(1-x)s} \frac{\sigma_t}{E}$$

Для U-образной свободной гибки:

$$\tan \Delta\alpha = 0,75 \frac{r_m + r_n + 1,25s}{(1-x)s} \frac{\sigma_t}{E},$$

где: x -коэффициент, определяющий положение нейтрального слоя в зависимости от r/s ,

-расстояние между опорами,

r_m -радиус матрицы,

r_n -радиус пуансона,

s -толщина образца,

E -модуль упругости.

Пружинение как функция изменения радиуса анализируется в работах Зубцова М. Е. с допущением, что относительный радиус гибки $R/s > 10$.

В результатах работы была представлена зависимость для получения заданного радиуса при определенном радиусе гибки [3]:

$$r = \frac{r'}{1 + 3 \frac{\sigma_T r'}{Es}},$$

где: r - заданный радиус,

r' - радиус детали.

Угол пружинения представлен зависимым от радиуса гибки :

$$\Delta\alpha = (180 - \alpha') \left(\frac{r'}{r} - 1 \right),$$

где α' -угол образца после разгрузки.

В приведенных формулах авторы [2, 3] не учитывают упрочнения возникающие в процессе деформации металла, а опираются только на напряжение текучести и модуль упругости материала.

В работах Попова Е. А., посвященных изгибу и пружинению имеются допущения и предположения, что при толщине меньшей, чем радиус гибки, зона немоной деформации мала, длина нейтральной поверхности остаётся неизменной, поворот осуществляется по слою, с которым совпадает нейтральная поверхность [4].

При анализе пружинения были сделаны допущения, что можно пренебречь напряжени-

ями σ_p и зона упругих деформаций пренебрежимо мала.

Угол пружинения представлен зависимым от радиуса и толщины образца:

$$\Delta\alpha = \frac{3/2\sigma_T + \Pi \frac{s}{2r+s} \left(\frac{r}{s} + 1 \right)}{E} \alpha,$$

где: r - радиусгиба,

Π - модуль упрочнения.

Данная формула учитывает упрочнение материала с использованием линейной аппроксимации упрочнения, что увеличивает достоверность полученных результатов. Однако изменения угла пружинения от изгибаемого угла представлены прямой зависимостью, что не всегда согласуется с экспериментальными данными.

Этот недостаток устранен в работах Калпина Ю.Г., в которых был проведён расчёт угла пружинения без правки при силе сжатия, равной нулю [5].

Изгибающий момент равен:

$$M \approx b \left(\frac{\sigma_m s^2}{4} + \frac{\Pi s^3}{12\rho} \right).$$

Была получена формула для расчёта пружинения при больших радиусах гибки:

$$\Delta\alpha = \frac{3\sigma_T \rho_0 (\pi - \alpha)}{Es} + \frac{\Pi}{E} (\pi - \alpha).$$

При малых радиусах гибки:

$$\Delta\alpha \approx \frac{3\sigma_T \rho_0 (\pi - \alpha)}{Es} + \frac{\Pi}{E} (\pi - \alpha) + \frac{6\rho_0 \sigma_T}{Es \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} - \frac{l\sigma_T}{Es \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)},$$

где ρ_0 - радиус нейтрального слоя на последней стадии гибки.

В работах Томлёного А. Д. пружинение описывается как состояние упругой разгрузки, в результате которой возникают остаточные напряжения. Состояние разгрузки можно получить, приложив к изгибаемому образцу упругий момент, равный по величине и противоположный по знаку пластическому изгибающему моменту [6].

Величину остаточных напряжений в наружных волокнах автор представляет в виде:

$$\sigma_c = -\sigma_s \left(\frac{W_e + W_p + W_d}{W} - 1 \right) + \Delta\sigma_s,$$

где: σ_c - остаточные напряжения,

σ_s - предел текучести.

В работах Матвеева А. Д. [7] показывается, что упругие деформации при разгрузке заготовки могут привести к продольным деформациям, равномерно распределённым по соответствующим сечениям, и деформациям изгиба.

Оставшаяся после разгрузки кривизна:

$$\frac{1}{\rho_{н.о}} = \frac{1}{\rho_n} - \frac{1}{\rho_{н.р.}},$$

где: ρ_n - радиус нейтрального слоя,

$\rho_{н.о}$ - радиус нейтрального слоя после разгрузки,

$\rho_{н.р.}$ - радиус нейтрального слоя разгрузки.

При круговой гибке изменение кривизны заготовки вызывает изменение угла дуги нейтральной линии на величину:

$$\Delta\alpha = \alpha \left(1 - \frac{\rho_n}{\rho_{н.о.}} \right),$$

При некруговой гибке, изменению формы нейтральной линии соответствует изменение угла:

$$\Delta\alpha = \alpha' - \alpha.$$

В своих работах по исследованию изгиба Матвеев А.Д. учитывает степенное упрочнение материала и учитывает изменение положения нейтрального слоя в процессе деформирования. Однако данные расчеты возможны только численно.

У.Джонсон рассматривал процесс пружинения для случая плоского напряжённого состояния и плоской деформации [8]. И получил следующие зависимости:

- при плоско-напряжённом состоянии

$$\frac{r}{r'} = \left(\frac{Yr}{Es} + 1 \right) \left(2 \frac{Yr}{Es} - 1 \right)^2,$$

- при плоско-деформированном состоянии

$$\frac{r}{r'} = 1 - 3 \left(\frac{Yr}{Es} \right) (1 - \nu^2) + 4 \left(\frac{Yr}{Es} (1 - \nu^2) \right)^3,$$

где ν - коэффициент Пуассона.

Бондарь В.С. представил математическую модель изгиба листа, позволяющую спрогнозировать эффект пружинения в условиях обобщенной плоской деформации [9].

Разработанная математическая модель изгиба Бондаря В.С. рассматривает деформацию под действием кольцевого момента как упругопластический изгиб и последующую упругую разгрузку. Автором предлагается универсальная характеристика пружинения: изменения относительной кривизны пружинения как функции от относительной кривизны листа. Однако, как отмечает сам автор, на практике возникают расхождения при одной и той же кривизне листа, но при разных углах изгиба (хотя эти отличия не превышают 15% [9]).

Современные исследования пружинения можно разделить на несколько направлений, которые включают в себя влияние методов и способов изгиба на пружинение, сравнение экспериментальных данных с расчетными значениями и получение эмпирических зависимостей. Можно выделить отдельным направлением поведение многослойных материалов при пружинении.

В работе К. Yilamua, R. Hinob, H. Hamaakib, F. Yoshidab [10] проведены экспериментальные исследования и расчет методом конечно-элементного анализа влияния параметров изгиба, а именно: влияние толщины и расположение слоев, углагиба и свойств материала на пружинение.

В результатах исследований можно увидеть, что расположение разнотолщинных слоев влияет на параметры изгиба, изменяется толщина образцов и радиусгиба, но расположение слоев оказывает минимальное воздействие на пружинение.

Автор использует два варианта расположения слоев нержавеющей стали (SS) и алюминия (AL), толщина алюминиевого листа больше стального.

$$\begin{aligned} SS_{вн} / AL_{в}, & \quad AL_{в} > SS_{вн} \\ AL_{вн} / SS_{в}, & \quad AL_{вн} > SS_{в} \end{aligned}$$

Также авторы сравнивают две расчетные модели (обычная модель изотропическая модель упрочнения и кинематическая модель упрочнения Yoshida–Uemori) при проведении конечно-элементного анализа. Модель Yoshida–Uemori показала лучшую корреляцию с экспериментальными данными в связи с учетом в ней эффекта Баушингера (одним из важных факторов для расчета пружинения многослойных материалов).

Tekaslan A., Nedim Gerger B., Ulvi Seker [11] В работе исследовано изучают влияние

параметров процесса на величину пружинения. Используя четыре способа настройки процесса, определяют значения пружинения для четырех вариантов. При первом и втором способе пуансон не доходил до поверхности матрицы на величину толщины материала, при втором случае он выдерживался в данном положении 20 секунд. При третьем и четвертом варианте пуансон опускался до предельно возможного положения, в четвертом варианте выдерживался в течении 20 секунд. Испытанию подвергались разнотолщинные образцы из нержавеющей стали при нескольких углах гибки.

Результаты показали, что выдержка в течение 20 секунд способствует уменьшению пружинения на 1-3 градуса. Угол гибки влияет в большей степени на пружинение, нежели толщина образца.

Отношение между углом пружинения ($\Delta\alpha$) углом гiba (α) и внутренним углом матрицы (α') авторы записывают в виде:

$$\alpha' = \alpha - \Delta\alpha.$$

Также исследовали влияние параметров процесса на пружинения проводили Se Young Kim, Won Jong Choi, Sang Yoon Park. [12] Испытанию подвергались многослойные панели типа CLARE из двух слоев алюминия с соединительным центральным слоем, состоящим из стекловолокна с эпоксидным составом.

В ходе эксперимента были рассмотрены влияние размера инструмента на пружинение, а также настройки процесса (скорость движения пуансона, нагрузка (сила), температура).

Базовая формула для прогнозирования пружинения подставлена как функция от радиуса и скорости (деформации) и рассчитывалось как влияние момента.

$$M = \Delta M$$

$$M = \int_t^t w \sigma_y z dz \quad \Delta M = \int_t^t w \Delta \sigma_y z dz$$

Образцы подвергались испытанию с разным радиусами гибки и скорости перемещения пуансона.

Испытания показали, что нагрузка - один из главных факторов, влияющих на пружинение. При увеличении нагрузки и температуры пружинение уменьшается, при увеличении температуры на 100% по сравнению с комнатной пружинение уменьшается на 19%. Увеличение скорости увеличивает пружинение из-за возникновения больших остаточных напряжений, уменьшение радиуса приводит к увеличению пружинения в связи с большой упругой деформацией в нейтральном слое.

M. Kleiner, V. Hellinger [13] проводили исследование по влиянию температуры на пружинения многослойного вибропоглащающего материала. Испытывали многослойный материал с толщиной стальных листов 1 мм и нейтральным слоем с вязкими свойствами толщиной 0,06 мм. Изучалось поведение материала при упругой разгрузке как одним из важных параметров, влияющих на пружинение.

Использовался выборочный нагрев центральной части образца. При увеличении температуры увеличивается скорость разгрузки и происходит уменьшение остаточных напряжений, что приводит к уменьшению пружинения.

В работе M.H.Parsa, S. Nasher Al Ahkami, M. Ettehad [14] показано влияние эффекта Баушингера на поведение многослойных образцов при пружинении. Ими были проведены серия экспериментов с многослойными листами алюминий/полипропилен/алюминий толщиной 1,5, 2 мм по изгибу в двух направлениях с последующим сравнением результатов с расчетом.

Показано влияние инструмента на пружинение в обоих направлениях, увеличение радиуса в одном направлении уменьшает пружинение в другом, перпендикулярном. Многослойный материал имел меньшее значение пружинения по сравнению с однослойным материалом той же жесткости.

Конечно-элементного анализ показал несогласованность с данными эксперимента которую можно отнести к неучету Эффекта Баушингера и к неравномерности распределения

сдвиговых деформаций на границе раздела слоев полипропилена и алюминия

Z.Tan, B.Persson and C.Magnusson [15] была предложена эмпирическая модель путем объединения теоретического анализа и экспериментальных исследований при контролируемом положении пуансона для получения необходимого угла изгиба после разгрузки. Необходимое перемещение пуансона складывается из двух компонентов: глубины, формирующей пластический изгиб образца, и глубины при которой происходит упругая разгрузка:

$$H = H_p + H_e,$$

где:

$$D = 2k \left(R_p + \frac{t}{2} \right) \sin \alpha$$
$$H_e = B_e + k_e \alpha$$

Из сравнения экспериментальных результатов с прогнозированием используя DNC системы и эмпирической модели, видно, что пружинение при v-образной гибке может быть хорошо контролируемым перегибом листового металла до точных значений. Отклонение по данной модели, между прогнозированным углом после разгрузки и заданным углом изгиба, измеряется в пределах 0,5 градуса. В качестве недостатка данной модели представлено, что влияние свойств материала может быть неявно показано в виде регрессивной константы, это не позволяет предсказанный угол пружинения сопоставить с углом гибки.

Выводы

Большинство классических теорий учитывающие пружинения относятся к однородному по толщине материалу. В связи с чем использование их для многослойных конструкций неприменимо, так как это приводит к неточностям при расчете [16, 17]. Использование усредненных показателей для комбинированных материалов возможно только для симметричных биметаллов. При возможности смещения слоев в процессе деформации между собой (в случае упругого и вязко-упругого соединительного слоя) неприемлемо использование усредненных параметров. В этом случае требуется введения дополнительных параметров, таких как напряжение контакта между слоями [18-21].

Имеющиеся в настоящее время численные программные методы обладают существующими ограничениями. Либо метод применим для численного расчета в области упругих или упруго-пластических деформаций, либо - для численного расчета в области пластических деформаций, что ограничивает возможность численного расчета пружинения при малых углах, где присутствуют все три области.

Большинство теорий имеет линейную зависимость между геометрическими параметрами и углом пружинения, но для более полной картины при прогнозировании пружинения требуются нелинейные зависимости, отдельно для малых и больших радиусовгиба. Данные зависимости представлены в работе Ю.Г. Калпина, опираясь на которую можно вывести теоретические зависимости для многослойных материалов.

В связи с растущими потребностями обработки многослойных материалов в ближайшее время исследователям необходимо решить проблему пружинения многослойного материала. Подвести необходимый теоретический базис для прогнозирования угла пружинения и его компенсации путем совершенствованием существующих теорий.

Литература

1. Schuler GmbH, Metal Forming Handbook, Springer, Berlin 1998 г.
2. Романовский В.П., Справочник по холодной штамповке, Машиностроение, Ленинград, 1979 г., -520 с.
3. Зубцов М. Е. Листовая штамповка, Машиностроение, Ленинград, 1980 г. -432 с.
4. Попова Е. А., Основы теории листовой штамповки, Машиностроение, Москва, 1977 г., - 278с.
5. Норицын И. А., Калпина Ю. Г., Определение угла пружинения при одноугловой гибке, Вестник Машиностроения, №1, Москва, 1968 г. 63-66 с.
6. Томленов А.Д. Механика процессов обработки металлов давлением, МАШГИЗ, Москва, 1963. - 236 с.

7. Матвеев А. Д., Пластический изгиб листа при неизменной толщине, Известия ВУЗов, Машиностроение, Москва, 1983 г., №1, 12-18с
8. Джонсон У., Меллор П.Б., Теория пластичности для инженеров, Машиностроение, Москва, 1979 г., — 567 с.
9. Бондарь В. С., Типалин, С. А., Шпунькин. Н. Ф., Вязкопластический изгиб и скручивание листа, МГТУ «МАМИ», Москва, 2003 г., -168с
10. K. Yilamu, R. Hino, H. Hamasaki, F. Yoshida, Air bending and springback of stainless steel clad aluminum sheet, Journal of Materials Processing Technology, №210, Elsevier, 2010 г. 272–278с.
11. Tekaslan O., Nedim Gerger B., Ulvi Seker, Determination of spring-back of stainless steel sheet metal in “V” bending dies, Materials and Design, №29, Elsevier, 2008 г. 1043–1050с.
12. Se Young Kim, Won Jong Choi, Sang Yoon Park, Spring-back characteristics of fiber metal laminate (GLARE) in brake forming process, Int J Adv manuf Technol, №32, Springer, 2007 г., 445–451 с.
13. M. Kleiner, V. Hellinger, New Possibilities for Improved Bending of Vibration Damping Laminated Sheets, Annals of the CiRP, №48, 1999 г. 217-220 г.
14. M.H. Parsa, S. Nasher Al Ahkami, M. Ettehad, Experimental and finite element study on the spring back of double curved aluminum/polypropylene/aluminum sandwich sheet, Materials and Design, №31, Elsevier, 2010 г., 4174–4183с.
15. Z. Tan, B. Persson and C. Magnusson, An empiric model for controlling springback in V-die bending of sheet metals, Journal of Materials Processing Technology, №34, Elsevier, 1992 г. 449-455с.
16. Типалин С.А. Исследование и разработка методики расчета процесса профилирования ленты при локальном формоизменении /Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва. 1998.
17. Типалин С.А., Шпунькин Н.Ф., Колесов А.В. Упругий изгиб биметаллического листа Известия МГТУ «МАМИ» 2013. Т. 2. № 1. С. 103-106.
18. Шпунькин Н.Ф., Типалин С.А. Исследование свойств многослойных листовых материалов / Заготовительные производства в машиностроении 2013 №1 С.28-311.
19. Типалин С.А., Сапрыкин Б.Ю., Шпунькин Н.Ф. Краткий обзор многослойных листовых деформируемых материалов используемых для защиты от шума / Известия МГТУ «МАМИ» 2012. №2. С.194-199
20. Типалин С.А., Шпунькин Н.Ф., Никитин М.Ю., Типалина А.В. Экспериментальное исследование механических свойств демпфирующего материала / Известия МГТУ «МАМИ» 2010. №1. С. 166-170.
21. Шпунькин Н.Ф., Типалин С.А. Никитин М.Ю. Листовой демпфирующий материал для кузовных деталей. Свойства при сдвиговой деформации/ Автомобильная промышленность, 2010, №10 С.39-40

Теоретические и технологические аспекты обжима трубных заготовок

д.т.н. проф. Сосенушкин Е.Н., доц. Яновская Е.А., Хачатрян Д.В., Киндеров В.Ю.
 ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН»
 8(499)972-94-53, sen@stankin.ru

Аннотация. На основе предложенной математической модели рассмотрено напряженно-деформированное состояние трубной заготовки при обжиме конической матрицей. Основные соотношения, полученные в ходе теоретического анализа, позволяют оценить напряжения в очаге деформации, определить поле деформаций и рассчитать длину исходной трубной заготовки.

Ключевые слова: обжим, труба, матрица, напряжение, деформация, анизотропия.