

РАЗРАБОТКА МЕТОДА УЧЕТА ПРУЖИНЕНИЯ ПРИ ГИБКЕ С РАСТЯЖЕНИЕМ

© 2024 А.А. Лапышев, Д.И. Шишлянников

Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия

Статья поступила в редакцию 06.06.2024

В статье рассматривается методика расчета пружинения при моделировании обтяжного пуансона для изготовления деталей типа стригнер или шпангоут методом гибки с растяжением. После формообразования на прессе и снятия усилий, заготовка под действием упругих напряжений будет стремиться принять первоначальную форму, в результате чего радиус полученной детали всегда будет меньше, чем радиус обтяжного пуансона. Следовательно, для повышения точности изготовления деталей при проектировании пуансонов необходимо учитывать возможное пружинение. В настоящее время существует несколько методик учета пружинения, но они не всегда подходят для учета пружинения на пуансоне сложной формы, с переменным радиусом кривизны и прямолинейными участками. Исходя из этого, существует потребность в разработке новой, универсальной методики с реализацией в виде программного продукта. Сущность предложенного метода заключается в разбиении контура детали на ряд участков, заданных в качестве прямых постоянных радиусов, а затем в пересчете пружинения последовательно для каждого участка, с возможностью задания коэффициента пружинения. Полученный контур позволит спроектировать обтяжной пуансон, обеспечивающий более точное изготовление деталей.

Ключевые слова: пружинение, гибка с растяжением, обтяжной пуансон.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-4(3)-408-414

EDN: NTVRJB

ВВЕДЕНИЕ

При разработке конструкций летательных аппаратов весьма широкое применение имеют криволинейные профильные детали. Их отличительными особенностями в условиях и требованиях к изготовлению являются большое разнообразие типов, размеров, а также малая серийность. Для изготовления деталей из профильного и листового металла применяют специальные прессы и станки. При этом формообразование самой детали происходит при помощи формоизменяющего элемента, который принято называть пуансоном [1, 2].

В связи со стремлением к постоянному улучшению лётно-технических характеристик современных летательных аппаратов, как следствие, повышаются требования к точности изготовления деталей, определяющих наружные обводы (обшивка, стрингера, нервюры, шпангоуты) самолёта. Однако, как уже было упомянуто ранее, технология обработки авиационных сплавов давлением отличаются повышенной изменчивостью размерно-механических параметров заготовок, мелкосерийностью

и многономенклатурностью. [3] Значительное влияние на данные процессы оказывают сложность кинематических схем, сложность разработки управляющих программ, а также высоким уровнем неопределенности. Он вызван тем, что зачастую в конструкторской документации представлена лишь информация о форме профиля детали, используемой непосредственно при сборке частей и агрегатов летательного аппарата. Это вызывает соответствующие трудности, так как детали, изготавливаемые на профилегибочных машинах, состоят из материалов, обладающих свойствами пластической деформации. Поэтому при прекращении действия внешних сил детали начинают восстанавливать свои исходные размеры и форму, то есть распружинивают, однако не полностью, а лишь до некоторого положения [4]. Как следствие, геометрические параметры детали не совпадают с указанными в конструкторской документации.

Для снижения негативного влияния остаточной деформации имеет место применение холодной деформации с растяжением, которая позволяет значительно (на порядок) снизить негативный эффект пружинения детали по сравнению с гибкой без растяжения [5].

В настоящее время пружинение при изготовлении обтяжных пуансонов учитывается с помощью эмпирических коэффициентов, вы-

Лапышев Алексей Александрович, старший преподаватель кафедры «Самолетостроение».

E-mail: alex.lapishev@yandex.ru

Шишлянников Дорофей Иванович, студент.

E-mail: shdoiv@mail.ru

Таблица 1. Определение коэффициента пружинения

Отношение радиуса гибки к толщине материала	0,1	0,3	0,5	1	2	5	10 и более
Коэффициент χ	0,323	0,356	0,379	0,421	0,455	0,477	0,500

численных еще в 60-е годы прошлого века (таблица 1) [6]. Однако при получении данных коэффициентах радиус гибки детали учитывался только приближенно и, более того, не учитывалось изменение радиуса гибки детали по всей длине пуансона.

Применение современных САПР для учета пружинения затруднено как из-за отсутствия специализированных модулей для учета пружинения, так и из-за недостаточного количества времени на своевременную подготовку управляющих программ в условиях быстрой смены номенклатуры деталей и инструментальной оснастки. [7]

При этом, был предпринят ряд попыток разработать универсальный метод учета пружинения [8, 9], была разработана математическая модель процесса гибки, однако эти разработки не получили должного применения.

В связи с этим, для повышения точности формообразования партии сложно-профильных деталей возникла потребность в разработке нового метода учета пружинения при гибке с растяжением, на основе данных имеющейся конструкторской документации с учётом формы профиля изготавливаемой детали так, чтобы при распружинении её профиль имел максимальное с требуемым сходство.

Полученный таким образом обтяжной пуансон будет требовать меньшее количество дополнительных работ, так как хотя зависимость пружинения от различных характеристик профиля детали носит весьма сложный характер [10], однако за счёт проведения серии экспериментов и внедрения нового алгоритма, появляется возможность существенного снижения количества дополнительных операций при запуске технологического процесса.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА УЧЕТА ПРУЖИНЕНИЯ

При проведении первоначальных анализов, было установлено, что рассматриваемую пластическую деформацию можно разделить на несколько различных подвидов, а именно: на линейную деформацию, характеризующую изменение какого-либо одного линейного параметра детали, и на угловую деформацию, характеризующую изменение углового параметра между какими-либо двумя линиями или плоскостями, обозначенными в деформируемой детали. Данные деформации целесообразно описывать отдельно, так как это позволит

находить более точные зависимости в каждом отдельном случае и устанавливать характер их изменений при различных параметрах используемой заготовки. [11]

Одной из основных сложностей описания и расчета процесса упругого пружинения дуги профиля детали является трудность аппроксимации нецентросимметричной дуги из-за сложности её формы с геометрической точки зрения. Примечательно, что в процессе формообразования при приложении растягивающих сил, выводящих материал заготовки в зону пластических деформаций, используют пуансон, изготавливаемый по шаблону, задающему требуемый контур детали. [12] [13] Однако для автоматизации процесса изготовления нахождения необходимой формы обтяжного пуансона, такой вид входящих данных практически неуместен, из-за своего весьма сложного аналитического представления. Поэтому дугу профиля детали наиболее рационально описывать как сплайн, образованный при помощи основных точек с указанными координатами. Тогда при его оцифровке появится возможность получения дополнительного, сколь угодно большого количества точек для уточнения его формы.

Так как процесс пружинения при снятии растягивающих и изгибающих сил с концов заготовки, последующий процессу гибки с растяжением, сопровождается уменьшением кривизны заготовки вследствие действия момента внутренних сил, вызывающего поворот сечений относительно оси, проходящей через их центр тяжести, то уменьшение кривизны формы профиля можно охарактеризовать некой величиной K , которая численно будет равна разнице между кривизной заготовки в нагруженном и разгруженном состояниях:

$$K = \frac{R_0}{R_1}, \quad (1)$$

где R_0 и R_1 – радиусы кривизны заготовки в нагруженном и разгруженном состояниях соответственно [14,15]. При этом не трудно установить, что R_0 является характеристикой не только детали, но и пуансона, предназначенного для её изготовления, если сама заготовка имеет относительно небольшую толщину, по сравнению с радиусом дуги.

Данная формула (1) является общей и служит для вычисления среднего значения относительной деформации, выражающей абсолютное изменение какого-либо параметра деформируемого тела (в данном случае угло-

вого размера), то есть отношение абсолютно-го изменения данного параметра к его первоначальному значению. Однако в большинстве случаев на практике имеются лишь данные радиуса кривизны требуемой детали R_1 , а радиус R_0 и коэффициент K , устанавливаемый в соответствии с такими параметрами заготовки, как радиус кривизны дуги, её толщина, а также упругие свойства используемого материала, приходится находить отдельно. Поэтому весьма уместно автоматизировать процесс нахождения данных параметров искусственным путём.

Для установления и описания основных закономерностей изменения формы профиля заготовки при её распружинении вначале были рассмотрены центросимметричные дуги профилей заготовок с постоянным радиусом, находящихся в нагруженном состоянии, и соответствующие им дуги профилей заготовок, находящихся в разгруженном состоянии, которые были рассчитаны посредством введения коэффициента K [16]. Немаловажно отметить, что изгиб детали при её изготовлении начинается с конкретной точки, в которой заготовка первоначально касается пуансона. Впоследствии именно от данной точки начинается распружинивание заготовки. Поэтому целесообразно расположить дугу профиля детали в декартовой системе координат на плоскости OXY так, чтобы данная точка схода дуги детали с дуги пуансона совпадала бы с точкой с координатами $(0; 0)$, с поворотом дуги детали так, чтобы касательная к дуге в данной точке лежала бы на оси OX , то есть совпадала бы с ней. Это позволит разделить дугу на две части и рассмотреть каждую из них по отдельности для более продуктивного анализа. Для удобства назовём указанную точку точкой критического изгиба. Итак, пары частей дуг заготовок были разбиты на некоторые равные количества точек с равным расстоянием друг

между другом по кривой. При этом каждой из исходных точек дуги заготовки под напряжением соответствовала точка на другой дуге уже распружинившей заготовки.

Пусть R_{11} и R_{21} – радиусы двух окружностей, полученных по трём соседним точкам на первоначальной и распружинившей дуге соответственно. O_{11} и O_{21} – точки центров данных окружностей соответственно. Тогда: $R_{11}=\text{const}$, $R_{21}=\text{const}$, $O_{11}(x_1; y_1)=\text{const}$, $O_{21}(x_2; y_2)=\text{const}$ (то есть точки O_{11} и O_{21} не меняют своего положения). Положения точек распружинившей дуги определяется посредством нахождения длины кривой разбитой окружности L и последующего применения формул геометрии окружности:

$$L=R_{11} \cdot \alpha_1, L=R_{21} \cdot \alpha_2 \Rightarrow R_{11} \cdot \alpha_1=R_{21} \cdot \alpha_2, \quad (2)$$

откуда:

$$\alpha_2=(R_{11} \cdot \alpha_1)/R_{21}, \quad (3)$$

где α_0, α_2 – углы секторов окружностей, образованные кривой длины L и радиусами R_{11} и R_{21} соответственно. Тогда координаты искомых точек дуги можно найти посредством пересечения расчетной окружности и окружности с радиусом C , равным длине хорды сектора, образованного кривой длины L на данной расчётной окружности. При чём центр окружности с радиусом C совпадает с точкой, расположенной к точке критического изгиба по дуге ближе всех точек, с помощью которых была построена данная расчётная окружность. То есть:

$$C=2R_{21} \cdot \sin(\alpha_2/2), \quad (4)$$

а из двух точек пересечения окружностей следует выбрать ту, что соответствует рассматриваемой части дуги и имеет меньшую координату по Y , что видно из рис. 1.

В действительности же детали с профилями дуг постоянного радиуса в авиастроении используются значительно реже, нежели с переменными. Поэтому далее был проведён анализ характера пружинения дуг с переменным ра-

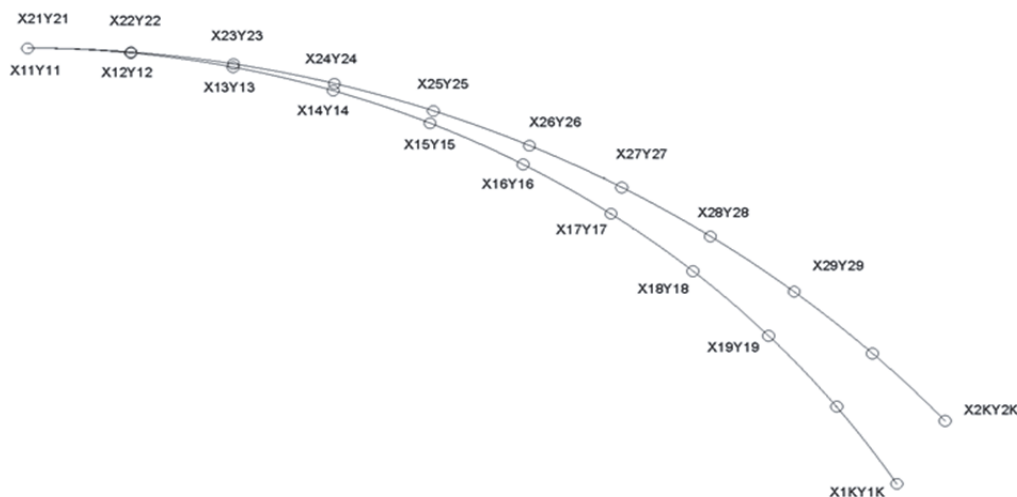


Рис. 1. Принципиальная схема метода учёта пружинения

диусом. Одним из наиболее важных характеристик такой дуги является тот факт, что изменение её каждого отдельного участка неизбежно оказывает влияние на следующие, расположенные рядом участки, поэтому каждый из них следует анализировать по отдельности для получения более точных расчётов. При этом следует понимать, что установить один постоянный параметр R для всей дуги не получится, так как по мере продвижения по дуге её радиус меняется в зависимости от кривизны рассматриваемого участка. А значит, следует заменить значение $R_{11}=\text{const}$ на набор нескольких радиусов.

В основе же принципа работы с профилем переменного радиуса лежит похожая концепция с применением геометрических формул окружности, однако в отличие от предыдущего, данный метод подразумевает изменение положения расчётных окружностей по дуге, причём окружность с первоначальным радиусом задаётся при помощи 3-х точек исходной дуги, лежащих рядом. После определения нового их положения происходит перерасчёт положений оставшихся точек с последующим их сдвигом на определённое расстояние. Затем процесс нахождения новой окружности повторяется для 2-х прежних и одной новой точки. Цикл длится вплоть до расчёта положений 3-х последних точек, расположенных на конце одной из частей дуги. Подобным образом происходит расчёт пружинения для всей второй части дуги. Для дальнейшего расчёта формы обтяжного пуансона, учитывающего упругое пружинение детали, был проведён ряд анализов, позволяющих установить зависимость между параметром R профиля детали, коэффициентом K и некоторыми другими поправочными коэффициентами, что позволило с применением формулы (1) устанавливать значение радиуса участка дуги пуансона, исходя из показателей его кривизны.

Для автоматизации данного процесса целесообразно применять методы программного вычисления с описанием алгоритма действий на каком-либо языке программирования. Это позволит сократить время на расчёты и даст возможность представления получаемой и исходной информации в различном виде, например, в текстовом или графическом виде.

В качестве языка программирования был выбран Python, в котором был реализован принципиальный алгоритм учета пружинения, основанный на вышеописанной методике расчета, который даёт на выходе координаты точек, необходимых для построения контура пуансона.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Проверка полученного метода учета пружинения велась в два этапа. На первом этапе была использована электронная модель уже имеющегося пуансона, которая прошла апробацию на предприятии и исправлена таким образом, чтобы изготовленный по этой электронной модели пуансон соответствовал требованиям учёта пружинения детали. (Рис. 2, Рис. 3) Эта модель была взята за эталон, относительно которого определялась корректность работы алгоритма, разработанного вышеупомянутым методом.



Рис. 2. 3D модель профиля

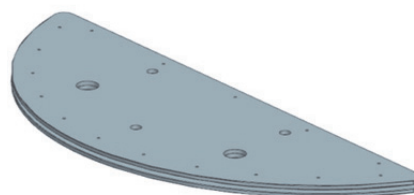


Рис. 3. 3D модель пуансона

В результате было установлено, что максимальная погрешность при расчете пружинения данным методом относительно эталона составляет до 2 мм.

Так как допустимые при изготовлении деталей данного вида погрешности равняются $\pm 0,5$ мм на один метр длины, то полученная в результате моделирования процесса форма пуансона имеет достаточную точность.

Второй этап – апробация разработанного метода на производстве. По полученным с помощью вышеописанного метода координатам точек была построена электронная модель пуансона, который за тем был изготовлен и применён для изготовления детали, которая в дальнейшем сравнивалась с эталоном (рис. 5). Полученное отклонение по всей длине соответствовало допуску.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной работе была разработана методика расчёта упругого пружинения профильных деталей, а также формы профиля обтяжного пуансона для гибки с растяжением.

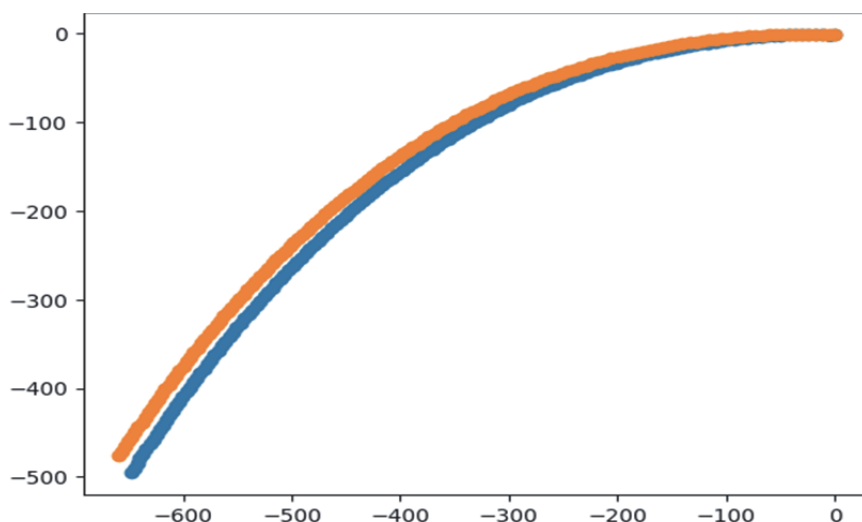


Рис. 4. Контур пуансона и контур детали после распружинивания



Рис 5. Сравнение полученной детали с эталоном

Полученная методика позволяет предупредить негативное влияние упругой деформации профиля при гибке с растяжением, и, как следствие, в разы уменьшить количество доводочных работ после распружинения профиля. Данная методика прошла проверку и апробацию на производственном предприятии, что позволило закрепить и уточнить полученные без практической основы результаты расчётов.

При этом полученная по данной методике алгоритм расчета в полной мере не учитывает форму профиля (на данном этапе учет формы профиля ведется с помощью добавочных коэффициентов) и степень растяжения заготовки при обтяжке, что влечет за собой необходимость в дальнейшей доработке полученного алгоритма.

Также следует помнить, что зависимость пружинения от различных характеристик профиля детали, таких, как радиус кривизны дуги сгибаемой части, её толщина, а также индивиду-

альные параметры, то есть упругие свойства используемого материала, носит весьма сложный характер, однако использование разработанного алгоритма позволяет существенно снизить количество необходимых доводочных работ при запуске производственного процесса в условиях развития современного авиастроения, появления новых материалов и конструкций, повышения требований к уровню организации производства и к качеству выпускаемой продукции, а также к её конкурентоспособности на внешнем и внутреннем авиационном рынке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Максименков, В.И. Изготовление деталей из листов и профилей для летательных аппаратов: Учебное пособие / В.И. Максименков, В.И. Корольков, В.В. Самохвалов, М.В. Молод. – Воронеж: ВГТУ, 2011.
2. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов дав-

- лением: Учебник для ВУЗов. Изд. 4-е, перераб. и доп. / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – М.: Машиностроение», 1977.
3. Ермолаев, В.И. Математическая модель процесса гибки с растяжением / В.И. Ермолаев, В.В. Ермолаева, М.Ю. Пичугин. – Текст: непосредственный // Молодой ученый. – 2016. – № 13(117). – С. 11-16.
 4. Самохвалов, В.Н. Научные основы технологических процессов обработки металлов давлением: учеб. пособие. / В.Н. Самохвалов. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2019 – С. 18-21.
 5. Кочетков, А.В. Расчет пружинения детали при гибке с растяжением с учетом дополнительных пластических деформаций при разгрузке / А.В. Кочетков, В.Б. Гнитько, В.И. Ермолаев, В.В. Ермолаева // Заготовительные производства в машиностроении. – 2014. – № 16. – С. 25-27.
 6. Громова, А.Н. Изготовление деталей из листов и профилей при серийном производстве / А.Н. Громова, В.И. Завьялова, В.К. Коробов, – М.: Оборонгиз, 1960.
 7. Ермолаев, В.И. Повышение эффективности управления на автоматизированных профилегибочных машинах за счёт уточнения математической модели процесса формообразования и оперативной коррекции и управляющих программ / В.И. Ермолаев // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: Межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 2004. – С. 3–15.
 8. Кочетков, А.В. Аналитическое решение задачи гибки с растяжением / А.В. Кочетков, И.Б. Челпанов, В.Б. Гнитько, В.И. Ермолаев // Вестник машиностроения. – 2000. – № 7. – С. 46–49.
 9. Бржозовский, Б.М. Совершенствование технологий изготовления трехметровых дорожных реек за счет силового формообразования / Б.М. Бржозовский, В.И. Ермолаев, А.Н. Карпов // Материалы Всерос. науч.-практ. конф. по диагностике автомобильных дорог. – Саратов: Росдортех, 2003. – С. 93-95.
 10. Романовский, В.П. Справочник по холодной штамповке. – 6-е изд., перераб. и доп. / В.П. Романовский – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. – С. 65-69.
 11. Кокорин, В.Н. Теория обработки металлов давлением (определение деформаций и напряжений при осадке): методические указания / В.Н. Кокорин, В.И. Филимонов – Ульяновск: УлГТУ, 2004. – 25 с.
 12. Гнитько, В.Б. Исследование технологических роботов для гибки с растяжением : автореф. дисс. ... канд. техн. наук / В.Б. Гнитько. – Санкт-Петербург, 1999. – 18 с.
 13. Ермолаева, В.И. Анализ процессов гибки с растяжением / В.И. Ермолаева, В.И. Ермолаев, С.Г. Пучкин // Молодой ученый. – 2017. – № 23(157). – С. 95-96.
 14. Килов, А.С. Производство заготовок. Листовая штамповка: Серия учебных пособий из шести книг. Книга 2. Получение заготовок из листового материала и гнутые профили / А.С. Килов, К.А. Килов. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. – 182 с.
 15. Бурдуковский, В.Г. Технология листовой штамповки: учебное пособие / В.Г. Бурдуковский. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 224 с.
 16. Тлустенко, С.Ф. Теория и Технология формообразования профилированных деталей из листового материала / С.Ф. Тлустенко. – Самара: Изд-во СГАУ, 2014. – С. 54-68.

DEVELOPMENT OF THE METHOD FOR ACCOUNTING FOR SPRINGINESS IN BENDING WITH STRETCHING

© 2024 A.A. Lapshev, D.I. Shishlyannikov

Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

The article discusses a method for modeling the process of billet springing during the shaping of parts such as stringer or frame by the method of bending with stretching. After forming on the press and removing the forces, the workpiece under the action of elastic stresses will tend to take its original shape, as a result of which the radius of the resulting part will always be less than the radius of the tight punch. Therefore, in order to increase the accuracy of manufacturing parts, when designing punches, it is necessary to take into account the possible spring. Currently, there are several methods for accounting for springing, but they are not always suitable for accounting for springing on a punch of complex shape, with a variable radius of curvature and rectilinear sections. Based on this, there is a need to develop a new, universal methodology with implementation in the form of a software product. The essence of the proposed method consists in dividing the contour of the part into a number of sections specified as direct constant radii, and then recalculating the spring sequentially for each section, with the possibility of setting the spring coefficient. The resulting contour will allow you to design a tight punch, which ensures more precise manufacturing of parts.

Key words: springiness, bending with stretching, tight punch.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-4(3)-408-414

EDN: NTVPIJB

REFERENCES

1. Maksimenkov, V.I. Izgotovlenie detalej iz listov i profilej dlya letatel'nyh apparatov: Uchebnoe posobie / V.I. Maksimenkov, V.I. Korol'kov, V.V. Samohvalov, M.V. Molod. – Voronezh: VGTU, 2011.
2. Storozhev, M.V. Teoriya obrabotki metallov davleniem: Uchebnik dlya VUZov. Izd. 4-e, pererab. i dop. / M.V. Storozhev, E.A. Popov. – М.: Mashinostroenie», 1977.
3. Ermolaev, V.I. Matematicheskaya model' processa

- gibki s rastyazheniem / V.I. Ermolaev, V.V. Ermolaeva, M.Yu. Pichugin. – Tekst: neposredstvennyj // Molodoy uchenyj. – 2016. – № 13(117). – S. 11-16.
4. *Samohvalov V.N.* Nauchnye osnovy tekhnologicheskikh processov obrabotki metallov davleniem: ucheb. posobie. / V.N. Samohvalov. – Samara: Izd-vo Samarskogo universiteta, 2019 – S. 18-21.
 5. *Kochetkov, A.V.* Raschet pruzhineniya detali pri gibke s rastyazheniem s uchetom dopolnitel'nykh plasticheskikh deformacij pri razgruzke / A.V. Kochetkov, V.B. Gnit'ko, V.I. Ermolaev, V.V. Ermolaeva // Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii. – 2014. – № 16. – S. 25-27.
 6. *Gromova, A.N.* Izgotovlenie detalej iz listov i profilej pri serijnom proizvodstve / A.N. Gromova, V.I. Zavyalova, V.K. Korobov, – M.: Oborongiz, 1960.
 7. *Ermolaev, V.I.* Povyshenie effektivnosti upravleniya na avtomatizirovannykh profilegibochnykh mashinah za schyot utocneniya matematicheskoy modeli processa formoobrazovaniya i operativnoj korrekcii i upravlyayushchih programm / V.I. Ermolaev // Avtomatizaciya i upravlenie v mashino- i priborostroenii: Mezhhvuz. nauch. sb. – Saratov: SGTU, 2004. – S. 3–15.
 8. *Kochetkov, A.V.* Analiticheskoe reshenie zadachi gibki s rastyazheniem / A.V. Kochetkov, I.B. Chelpanov, V.B. Gnit'ko, V.I. Ermolaev // Vestnik mashinostroeniya. – 2000. – № 7. – S. 46–49.
 9. *Brzhozovskij, B.M.* Sovershenstvovanie tekhnologij izgotovleniya trekhmetrovykh dorozhnykh reek za schet silovogo formoobrazovaniya / B.M. Brzhozovskij, V.I. Ermolaev, A.N. Karpov // Materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. po diagnostike avtomobil'nyh dorog. – Saratov: Rosdortekh, 2003. – S. 93-95.
 10. *Romanovskij V.P.* Spravochnik po holodnoj shtampovke. – 6-e izd., pererab. i dop. / V.P. Romanovskij – L.: Mashinostroenie. Leningr. otd-nie, 1979. – S. 65-69.
 11. *Kokorin, V.N.* Teoriya obrabotki metallov davleniem (opredelenie deformacij i napryazhenij pri osadke): metodicheskie ukazaniya / V.N. Kokorin, V.I. Filimonov – Ulyanovsk: UIGTU, 2004. – 25 s.
 12. *Gnit'ko, V.B.* Issledovanie tekhnologicheskikh robotov dlya gibki s rastyazheniem : avtoref. diss.... kand. tekhn. nauk / V.B. Gnit'ko. – Sankt-Peterburg, 1999. – 18 s.
 13. *Ermolaeva, V.I.* Analiz processov gibki s rastyazheniem / V.I. Ermolaeva, V.I. Ermolaev, S.G. Puchkin // Molodoy uchenyj. – 2017. – № 23(157). – S. 95-96.
 14. *Kilov, A.S.* Proizvodstvo zagotovok. Listovaya shtampovka: Seriya uchebnykh posobij iz shesti knig. Kniga 2. Poluchenie zagotovok iz listovogo materiala i gnutye profili / A.S. Kilov, K.A. Kilov. – Orenburg: GOU OGU, 2004. – 182 s.
 15. *Burdukovskij, V.G.* Tekhnologiya listovoj shtampovki: uchebnoe posobie / V.G. Burdukovskij. – Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2019. – 224 s.
 16. *Tlustenko, S.F.* Teoriya i Tekhnologiya formoobrazovaniya profilirovannykh detalej iz listovogo materiala / S.F. Tlustenko. – Samara: Izd-vo SGAU, 2014. – S. 54-68.