

УДК 621.7

ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА К ОЦЕНКЕ ИЗМЕНЕНИЯ ДИАМЕТРА ЦИЛИНДРА ПРИ ХОЛОДНОЙ ОСАДКЕ

Антонюк Ф.И., Калмыков В.В., Мкртчян А.Б.

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Калужский филиал, Калуга, e-mail: antonyuk.f.i@yandex.ru*

Настоящая статья посвящена одному из способов изготовления штучных заготовок, применяемых для холодного выдавливания стержневых изделий с фланцами на прессах. В этом случае к диаметральным размерам штучных заготовок предъявляют менее жесткие требования. ($\pm 0,3 \dots \pm 3$ мм) по сравнению с выдавливанием стаканов. Вначале исходные заготовки отрезают от калиброванных прутков, диаметр которых меньше требуемого. Для этого применяют либо лентопильные станки, либо другое металлорежущее оборудование. Необходимый диаметр и высоту штучным заготовкам обеспечивают осадкой с применением либо без применения смазки (алюминий, медь). В любом случае осажённые заготовки приобретают бочкообразную форму. Однако такой показатель формоизменения не может характеризовать точность наибольшего диаметра бочки, так как не учитывает его. В то же время этот наибольший диаметр выпуклости боковой поверхности определяет точность расположения штучной заготовки в матрице формоизменяющей операции. Поэтому целью выполненной работы является исследование статистическими методами анализа на основе выполненных многофакторных экспериментов, степени и характера влияния на отклик – наибольший диаметр осажённой штучной заготовки (d_0) таких факторов, как коэффициент контактного трения (μ), степень деформации исходных заготовок (ϵ) и относительная высота осажённых штучных заготовок (d_0/h). Штамповку осадкой штучных заготовок выполняли с применением партионной наладки на гидравлическом прессе. Необходимую силу для осадки устанавливали в процессе наладки заготовок без применения смазки. Затем не изменяя силы на ползуне пресса осаживали заготовки со смазкой. Результаты многофакторного эксперимента позволили получить адекватные модели регрессионного анализа и дополнить их дисперсионным анализом. В результате определено, что влияние фактора трения и степени деформации исходных заготовок на изменение (разброс) наибольшего диаметра штучных заготовок зависит от их относительной высоты (d/h). В частности, если при осадке относительно низких поковок ($d_0/h = 3,0$) доминирующее влияние на величину отклика (d_0) оказывает коэффициент контактного трения, то при осадке относительно высоких поковок ($d_0/h = 1,5$) влияние факторов ϵ и μ на величину отклика сопоставимо.

Ключевые слова: осадка, бочкообразование, коэффициент контактного трения, многофакторный эксперимент, регрессионный и дисперсионный анализ

THE APPLICATION OF STATISTICAL METHODS OF ANALYSIS TO ASSESS CHANGES IN THE DIAMETER OF THE CYLINDER WHEN COLD THE LEES

Antonyuk F.I., Kalmykov V.V., Mkrтчyan A.B.

Moscow State Technical University n.a. Bauman, Kaluga Branch, Kaluga, e-mail: antonyuk.f.i@yandex.ru

This article is devoted to one of the methods of making single-piece blanks, used for cold extrusion rod products with the flanges on the presses. In this case, the diametrical dimensions of the piece blanks, impose less stringent requirements. ($\pm 0,3 \dots \pm 3$ mm) compared to the squeezing of the glasses. First, the initial billet is cut off from the grooved rods, the diameter of which is less than required. To do this, use either CNC lathes or other cutting equipment. The required diameter and height of the piece to provide a draft of workpieces with the use of either no lubricant (aluminum, copper). In any case, upset the workpiece acquire a barrel shape. However, this rate of deformation cannot characterize the accuracy of the greatest diameter of the barrel, as it does not include it. At the same time, the largest diameter of convexity of lateral surface determines the accuracy of the location of the piece of the workpiece in the matrix formoizmeneniya operation. Therefore, the purpose of the performed work is the study by statistical methods of analysis based on the multiple-factor experiments, the extent and nature of influence on the response – the largest diameter of the upset piece of workpiece (dB) factors such as the coefficient of friction (μ), the degree of deformation of the original billet (ϵ) and the relative height of the upset piece blanks (d_0/h). Stamping draught piece blanks were used for batch adjustment on a hydraulic press. The necessary force for precipitation is established in the process of setting up the workpieces without the use of lubrication. Then without changing the force on the press RAM upsets the billet with the lubricant. The results of multifactor experiment allowed us to obtain an adequate model of the regression analysis and to Supplement them by dispersion analysis. In the result, it was determined that the impact of the factor of friction and the degree of deformation of the original workpiece change (range) largest diameter piece blanks depends on their relative height (d/h). In particular, if the sediment is relatively low forging ($d_0/h = 3,0$) a dominant influence on the magnitude response (d_0) having the coefficient of contact friction, when the sediment is relatively high forgings ($d_0/h = 1,5$) the influence of ϵ and μ on the magnitude of response comparable.

Keywords: sediment, barrel-shaped, the coefficient of contact friction, multiple-factor experiment, regression and analysis of variance

Штучные заготовки, применяемые для основных формоизменяющих операций холодной объемной штамповки, выполняемых на прессах, изготавливают различными

ми способами. Их выбор зависит не только от серийности производства, соотношения размеров штучных заготовок, но и от особенностей формоизменяющих операций.

Они диктуют требования к точности диаметральных размеров заготовок, обеспечивающих максимально допустимый зазор между стенкой матрицы и боковой поверхностью заготовки. При всем многообразии способов изготовления штучных заготовок всегда доминирует стремление обеспечить максимально возможную экономию материала поковки [4].

Наиболее точные по диаметру исходные заготовки относительно малой высоты для выдавливания тонкостенных стаканов из цветных сплавов изготавливают многорядной вырубкой из листа. При этом стремление обеспечить малоотходность приводит к необходимости в некоторых случаях замены круглой формы заготовок шестигранной.

Более высокие заготовки ($d/h = 0,6 \dots 1,0$) отделяют от калиброванных прутков безотходной резкой сдвигом в специальных штампах. Однако возникающие при этом искажения формы относительно коротких заготовок требуют введения дополнительной операции калибровки для их устранения [3].

В серийном производстве очень часто штучные заготовки отрезают от калиброванных прутков заведомо меньшего диаметра (с целью уменьшения отходов) либо на лентопильных станках или другом металлорежущем оборудовании с отходами в стружку. В этом случае максимальная длина отрезаемых заготовок не должна допустить потери их устойчивости в процессе последующей осадки для получения диаметра требуемой точности. Такая точность может быть высокой ($\pm 0,05$ мм) – при закрытой осадке осажённых заготовок в матрице – или менее точной, если выполняется открытая осадка для последующего выдавливания стержневых изделий с фланцами ($\pm 0,2 \dots \pm 0,6$ мм) [3].

Все применяемые как в отечественной, так и зарубежной промышленности способы изготовления штучных заготовок для холодной объемной штамповки и специальные требования, предъявляемые к ним, достаточно полно изложены в специальной справочной литературе [4].

Исключением является наименее точный (по диаметру) способ изготовления относительно высоких штучных заготовок, при котором отрезаемые от калиброванных прутков исходные заготовки приобретают необходимую точность диаметрального размера свободной (открытой) осадкой. В этом случае осаживаемая цилиндрическая заготовка, даже при наличии эффективной технологической смазки, приобретает бочкообразную форму. Такое искажение образующей цилиндра может быть значительным, так как часто заготовки из медных и алюминиевых сплавов осаживают без смазки.

Следует заметить, что явление бочкообразования в процессековки в условиях сухого трения в полной мере изучено рядом исследователей как в нашей стране, так и за рубежом [4, 8].

Для количественной оценки бочкообразности для условий горячего деформирования применяют объемный показатель, который не учитывает величины наибольшего диаметра бочки в срединном сечении (d_g). Такой показатель с учетом диапазона его рассеяния необходим для оценки точности штучной заготовки в процессах холодной объемной штамповки.

На необходимость оценки бочкообразности с привлечением диаметральных размеров указывали многие исследователи. Наиболее полно подобную задачу решил А.Л. Воронцов [2].

В частности, для характеристики выпуклости боковой поверхности при различных условиях трения он предложил использовать разность наибольшего диаметра бочки (d_g) и наименьшего диаметра торца осажённого цилиндра. Для описания формы его боковой поверхности он предложил зависимость для определения трех диаметров сечений, нормальных к оси поковки.

Следует отметить также работу, в которой автор на основе выполненных экспериментов исследовал форму выпуклости боковой поверхности осаживаемых в холодном состоянии поковок, а затем с учетом коэффициента контактного трения, относительной высоты исходных заготовок и степени их деформации аппроксимировал форму боковой поверхности дугами окружности [10].

Однако в полученных авторами решениях не учтено, что в реальных технологических процессах наряду с детерминированными связями между технологическими параметрами, влияющими на бочкообразность осаживаемых поковок, в том числе на наибольший диаметр d_g , существуют также стохастические связи. Причем взаимосвязь между параметрами зачастую носит двойственный характер в особых условиях обеспечения точности штампуемых поковок, которые присущи партионной наладке [1].

Особую роль в этом случае выполняют условия контактного трения, определяемые наличием либо отсутствием технологической смазки на торцах деформируемых заготовок.

Двойственный характер функции технологической смазки проявляется в том, что при наличии либо повышении ее эффективности уменьшается, с одной стороны, бочкообразность поковки, а с другой – она снижает силу сопротивления поковки деформированию, что при постоянной силе наладки приводит к уменьшению ее высоты

и вследствие этого к увеличению диаметра. Соотношение изменения высоты и диаметра поковки зависит от отношения ее размеров (d_0/h) [1].

Поэтому важным условием исследования является выявление сложной взаимосвязи (эффектов взаимодействия) всех факторов, оказывающих влияние на величину наибольшего диаметра (d_0) осажённой штучной поковки.

В подобных задачах наиболее целесообразным является выполнение многофакторных экспериментов и применение регрессионного и дисперсионного анализа к его результатам.

Как уже отмечалось, точность расположения в штампе штучной заготовки зависит от величины зазора между боковой поверхностью поковки (d_0) и стенкой формоизменяющей матрицы. Таким образом, цель выполненной работы – с помощью

коэффициент контактного трения: $x_3(\mu)$: 0,1(-1) и 0,3(+1). В качестве технологической смазки применяли животный жир. Материал заготовок – алюминиевый сплав АД1. Эксперимент выполняли на гидравлическом прессе модели П481А с номинальной силой 400 кН. Настройка пресса для получения необходимых размеров (d_0 и h) повок с наносенной смазкой выполняли без изменения силы настройки (наладки).

Результаты эксперимента в виде матрицы плана ПФЭ²³ представлены в таблице. Обработка результатов эксперимента выполнена в соответствии с общепринятой методикой [5].

В результате обработки результатов ПФЭ²³ получено следующее адекватное уравнение регрессионного анализа, определяющее зависимость отклика (d_0) от исследуемых факторов:

$$y(d_0) = 28,84 + 0,17x_1(\varepsilon) + 0,43x_2(d/h) - 0,48x_3(\mu) - 0,22x_1x_2(\varepsilon \cdot d/h) - 0,123x_2x_3(\mu \cdot d/h) + 0,182x_1x_2x_3(\varepsilon \cdot d/h \cdot \mu), \quad (1)$$

План ПФЭ²³ и его результаты

№ п/п	ε	d/h	μ	\bar{d}_0 , мм	№ п/п	μ	\bar{d}_0 , мм	$\Delta \bar{d}_0$, мм	$\delta \bar{d}_0$, %
1	0,36	3,0	0,3	28,82	5	0,1	29,6	±0,4	2,67
2	0,1	3,0	0,3	28,51	6	0,1	30,14	±0,8	5,7
3	0,36	1,5	0,3	28,29	7	0,1	29,30	±0,5	3,57
4	0,1	1,5	0,3	27,82	8	0,1	28,23	±0,2	1,47

статистических методов анализа выявить степень и характер влияния коэффициента контактного трения, степени деформации осадки исходных заготовок и относительной высоты осажённых цилиндрических повок на диапазон изменения наибольшего диаметра их боковой поверхности (d_0).

Для достижения поставленной цели был выполнен полный факторный эксперимент (ПФЭ²³), в котором в качестве отклика – выходного параметра технологической системы принят наибольший диаметр осажённой штучной заготовки – $y(d_0)$. Исследовали следующие факторы, влияющие на отклик: $x_1(\varepsilon)$ – степень деформации исходных заготовок по высоте, $x_2(d/h)$ – относительная высота исходных заготовок, $x_3(\mu)$ – коэффициент контактного трения.

Все факторы устанавливали на двух уровнях: нижнем (-1) и верхнем (+1). В частности, степень деформации варьировали следующим образом: $x_1(\varepsilon)$: 0,1(-1) и 0,4(+1). Относительная высота осажённых повок: $x_2(d/h)$: 1,5(-1) и 3,0(+1). Коэф-

Как следует из (1), наиболее сильное влияние при осадке на максимальный диаметр (d_0) повок оказывает коэффициент контактного трения (μ). Его увеличение от 0,1 (со смазкой) до 0,3 (без смазки) уменьшает величину диаметра d_0 . Влияние фактора трения на отклик (d_0) в 1,12 раза сильнее влияния относительной высоты поковки. С увеличением последней от 1,5 (высокие поковки) до 3 (низкие поковки) диаметр осажённой поковки увеличивается. Из главных линейных эффектов относительно слабое влияние на отклик (d_0) оказывает степень осадки исходных заготовок по высоте. При ее увеличении от 0,1 до 0,4 диаметр (d_0) увеличивается.

Следует отметить относительно сильное влияние двойных и тройных эффектов взаимодействия на отклик: ($\varepsilon \cdot d/h$); ($\mu \cdot d/h$) и ($\varepsilon \cdot d/h \cdot \mu$). Примечательно, что их влияние на отклик различно не только по силе – об этом свидетельствует различная величина коэффициентов регрессии, но и по характеру влияния – об этом говорят различные знаки

перед коэффициентами. Однако при этом их объединяет присутствие во всех трех коэффициентах фактора d/h – относительной высоты осажённых поковок.

Это указывает на то, что в подобных случаях следует отдельно анализировать влияние исследуемых факторов для относительно низких ($d/h = 3,0$) и относительно высоких ($d/h = 1,5$) поковок.

С целью проверки объективности регрессионного анализа, результаты ПФЭ³ подвергли также дисперсионному анализу [6]. Его результаты показывают, что вклад в дисперсию отклика (d_6) отдельных факторов и их взаимодействий составляет: вклад коэффициента контактного трения μ – 42,4%; фактора относительной высоты осаживаемых поковок d/h – 34,4%, а степени осадки ε – 5%. Среди эффектов взаимодействия наибольший вклад в дисперсию (изменчивость d_6) вносит эффект парного взаимодействия факторов ($\varepsilon \cdot d/h$) – 9% и тройного эффекта ($\varepsilon \cdot d/h \cdot \mu$) – 6,2%.

Для анализа изменения диаметра d_6 относительно низких поковок ($d/h = 3,0$) рассмотрим результаты ПФЭ² (опыты 1, 2, 5 и 6).

В результате обработки данных эксперимента получено следующее уравнение регрессионного анализа, связывающее отклик – диаметр d_6 осажённых поковок с факторами ε и μ .

$$y(d_6) = 29,2 - 0,05x_1(\varepsilon) - 0,6x_2(\mu) + 0,215x_1x_2(\varepsilon \cdot \mu). \quad (2)$$

Как следует из анализа (2), влияние трения (μ) на изменение диаметра относительно низких поковок доминирует. Влияние этого фактора на отклик в 12 раз сильнее влияния степени осадки (ε) и почти в 3 раза сильнее эффекта взаимодействия этих двух факторов. Знак перед соответствующим коэффициентом влияния фактора μ говорит о том, что при переходе коэффициента трения с нижнего ($\mu = 0,1$) на верхний уровень ($\mu = 0,3$) диаметр осажённой поковки d_6 уменьшается, так как такое изменение коэффициента трения увеличивает силу сопротивления поковки деформированию, вследствие этого уменьшается диаметр поковки и возрастает ее высота.

Влияние эффекта взаимодействия факторов ε и μ проявляется в том, что при увеличении степени деформации осадки и уменьшении коэффициента трения диаметр d_6 возрастает.

Дисперсионный анализ (2) показывает, что доминирующий вклад фактора трения (μ) в дисперсию отклика (d_6) составляет 87%, а остальные 12% объясняются влия-

нием фактора и его совместного влияния с фактором μ .

Для анализа изменения диаметра d_6 относительно высоких поковок ($d_6/h = 1,5$) рассмотрим результаты ПФЭ² (опыты 3, 4, 7 и 8 (таблица)).

Для высоких поковок уравнение регрессионного анализа имеет вид

$$y(d_6) = 28,41 + 0,385x_1(\varepsilon) - 0,355x_2(\mu) - 0,15x_1x_2(\varepsilon \cdot \mu). \quad (3)$$

Из (3) видно, что по сравнению с осадкой низких поковок (2) принципиально изменяется характер влияния на отклик (d_6) степени осадки (ε) и совместного влияния факторов ε и μ . Об этом можно судить по изменению знаков перед соответствующими коэффициентами регрессии (по сравнению с (2)).

Прежде всего анализ (3) говорит о том, что силы влияния степени деформации ε и коэффициента контактного трения μ на отклик сопоставимы.

Влияние степени деформации осадки (ε) лишь в 1,08 раза сильнее влияния коэффициента контактного трения (μ). Знак минус перед коэффициентом регрессии фактора μ свидетельствует о том, что при его увеличении с 0,1 (наличие смазки) до 0,3 (отсутствие смазки) диаметр осажённой поковки d_6 уменьшается. При увеличении степени деформации осадки отклик (d_6) увеличивается. При этом влияние степени осадки усиливает влияние фактора трения на отклик. Об этом свидетельствует знак минус перед коэффициентом взаимодействия факторов ε и μ .

Дисперсионный анализ (3) согласуется с регрессионным и говорит о том, что почти 50% вариации отклика объясняется влиянием степени деформации (ε) и 42,6% – фактором трения (μ).

Как можно судить по результатам выполненного эксперимента, любые изменения силы трения на контактных поверхностях осаживаемых поковок приводят к изменению (статистическому разбросу) размеров высоты и диаметра осаживаемых поковок. Таким образом, источником неопределённости является возможное изменение условий трения. Известно, что влияние подобных изменений на рассеяние размеров диаметра и высоты осаживаемых поковок различно и зависит от соотношения этих размеров [1].

В выполненном эксперименте (таблица), основываясь на его результатах, можно наглядно показать, как в условиях изменения условий трения факторы ε и d/h влияют на относительное увеличение диаметра осажённых поковок, при изменении коэффициента трения от $\mu = 0,3$ (опыты 1...4 (таблица)) до $\mu = 0,1$ (опыты 5...8 (таблица)).

В результате получено следующее уравнение регрессионного анализа, связывающее относительное изменение диаметра поковок со смазкой и без нее:

$$y(\delta d_0, \%) = 3,35 - 0,23x_1(\varepsilon) + 0,833x_2(d/h) - 1,283x_1x_2(\varepsilon \cdot d/h). \quad (4)$$

Уравнение регрессионного анализа (4) показывает влияние исследуемых факторов на отклик – относительное изменение диаметра d_0 осаживаемых поковок при гипотетически возможном максимальном изменении условий контактного трения в результате изменения коэффициента контактного трения μ от 0,1 до 0,3 [3].

Из (4) можно заключить, что наиболее сильное влияние на отклик (d_0) при столь значимом изменении условий трения оказывает относительная высота поковки d/h . Ее влияние на отклик более чем в 3 раза сильнее влияния степени осадки (ε). Причем, если увеличение d/h с (-1) до (+1), что означает переход от высоких поковок ($d/h = 1,5$) к низким ($d/h = 3,0$) отклик увеличивается.

Однако по сравнению с главными эффектами по силе влияния на отклик доминирует эффект парного взаимодействия факторов ε и d/h . Его влияние в 1,6 раза сильнее влияния фактора d/h . Знак при коэффициенте парного взаимодействия говорит о том, что минимальное относительное уменьшение диапазона рассеяния диаметра d_0 будет обеспечено, если относительно высокая поковка ($d/h = 1,5$) осаживается с малой степенью осадки ($\varepsilon = 0,1$), а относительно низкая ($d/h = 3,0$) – с большой – ($\varepsilon = 0,36$) (таблица).

Дисперсионный анализ показывает, что вклад фактора d/h в дисперсию отклика – относительную погрешность диаметра поковок составляет 29%, степени осадки 2,2%, а совместное влияние факторов – 68%.

Выводы

На основе многофакторных экспериментов с применением статистических методов анализа установили:

1. Диапазон рассеяния наибольшего диаметра выпуклости боковой поверхности осаживаемых заготовок, определяющий их точность, зависит от их относительной высоты (d_0/h).

2. При осадке относительно низких штучных заготовок ($d_0/h = 3,0$) доминирующее влияние на изменение диаметра наибольшей выпуклости оказывает коэффициент контактного трения.

3. При осадке относительно высоких штучных заготовок ($d_0/h = 1,5$) изменение (рассеяние) диаметра выпуклости боковой поверхности практически в равной степени зависит как от коэффициента контактного трения, так и от степени осадки исходной заготовки.

4. Влияние возможного изменения коэффициента контактного трения на изменение диаметра штучных заготовок зависит от совместного влияния факторов ε и d_0/h так, что минимальное изменение диаметра выпуклости может быть обеспечено высоким штучным поковкам, осаживаемым с низкой степенью осадки, ($\varepsilon = 0,1$), а при осадке низких поковок, напротив, с большой ($\varepsilon = 0,4$).

Список литературы

1. Антонюк Ф.И., Вяткин А.Г., точность холодной осадки цилиндрических заготовок // КШП.ОМД. – 2000. – № 10. – С. 16–21.
2. Воронцов А.Л. Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением: учебное пособие: в 2 т. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
3. Евстратов В.А. Основы технологии выдавливания и конструирования штампов. – Харьков: Высшая школа, 1987. – 144 с.
4. Ковка и штамповка: справочник. В 4-х т. Т.3 Холодная объемная штамповка / под ред. ред. Г.А. Навроцкого. – М.: Машиностроение, 1987. – 384 с.
5. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. – М.: машиностроение; София.: Техника, 1980. – 304 с.
6. Рыжов Э.В., Горленко О.А. Математические методы в технологических исследованиях. – Киев: Наукова думка, 1990. – 187 с.
7. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. – М.: Машиностроение; 1971. – 434 с.
8. Теория пластических деформаций металлов / под ред. Е.П. Унксова, А.Г. Овчинникова. – М.: машиностроение, 1983. – 598 с.
9. Kajtoch J. Strain in upsetting processes // Metallurgy and foundry engineering. – 2007. Т. 33. – № 1. – С. 51–61.
10. Malayappan S., Esakkmuthu G. Barreling of aluminium solid cylinders during cold up setting with differential frictional conditions at the faces // The international Journal of advanced manufactory technology. – 2006. – t. 29. – № 1–2. – С. 41–48.

References

1. Antonjuk F.I., Vjatkin A.G., tochnost holodnoj osadki cilindricheskikh zagotovok // KShP.OMD. 2000. no. 10. pp. 16–21.
2. Voroncov A.L. Teorija i raschety processov obrabotki metallov davleniem: uchebnoe posobie: v 2t. M.: Izd-vo MG TU im. N.E. Bauman, 2014.
3. Evstratov V.A. Osnovy tehnologii vydavlivaniija i konstruirovaniija shtampov. Harkov: Vysshaja shkola, 1987. 144 p.
4. Kovka i shtampovka: spravochnik. V 4-h t. T.3 Holodnaja obemnaja shtampovka / pod red. red. G.A. Navrockogo. M.: Mashinostroenie, 1987. 384 p.
5. Novik F.S., Arsov Ja.B. Optimizacija processov tehnologii metallov metodami planirovaniija jeksperimentov. M.: mashinostroenie; Sofija.: Tehnika, 1980. 304 p.
6. Ryzhov Je.V., Gorlenko O.A. Matematicheskie metody v tehnologicheskikh issledovaniijah. Kiev: Naukova dumka, 1990. 187 p.
7. Storozhev M.V., Popov E.A. Teorija obrabotki metallov davleniem. M.: Mashinostroenie; 1971. 434 p.
8. Teorija plasticheskikh deformacij metallov / pod red. E.P. Unskova, A.G. Ovchinnikova. M.: mashinostroenie, 1983. 598 p.
9. Kajtoch J. Strain in upsetting processes // Metallurgy and foundry engineering. 2007. T. 33. no. 1. pp. 51–61.
10. Malayappan S., Esakkmuthu G. Barreling of aluminium solid cylinders during cold up setting with differential frictional conditions at the faces // The international Journal of advanced manufactory technology. 2006. t. 29. no. 1–2. pp. 41–48.