

УДК 621.7.044

**Моделирование процесса свободной растяжки трубчатой заготовки при гидродинамической штамповке / Зайцев В. Е., Сукайло В. А., Корбач В. Г., Ходько А. А. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 42(1015). – С. 69–77. Библиогр.: 9 назв.**

Проведено скінченно-елементне моделювання процесу вільної розтяжки трубчастої алюмінієвої заготовки за допомогою програмного комплексу LS-DYNA. Досліджені особливості деформування трубчастого зразка під дією імпульсного навантаження рідинним передавальним середовищем в технологічній системі гидродинамічної штамповки. Отримано кількісний опис хвильових явищ у передавальному середовищі, що визначають параметри зовнішнього навантаження на заготовку. Виконано порівняння результатів моделювання з експериментальними значеннями.

**Ключові слова:** гидродинамічне штампування, деформування зразка, метод скінченних елементів, рівняння стану Грюнайзена, модель Джонсона-Кука.

Finite element simulation of the aluminum tubular blank free stretching has been carried out using the LS-DYNA code. Features of the specimen deformation under impulse loading by fluid transmission medium in the technological system of hydrodynamic stamping have been studied. The quantitative description of wave phenomena in fluid transmission medium determining the parameters of the external load on the workpiece has been obtained. The comparison of simulation results with the experimental values has been performed.

**Keywords:** hydrodynamic stamping, specimen deformation, finite element method, Gruneisen EOS, Johnson-Cook model.

УДК 621.923

**И. Е. ИВАНОВ**, канд. техн. наук, ГВУЗ «ПГТУ», Мариуполь;  
**Ф. В. НОВИКОВ**, докт. техн. наук, ХНЭУ, Харьков;  
**С. А. ДИТИНЕНКО**, канд. техн. наук, ХНЭУ, Харьков.

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА УПРОЧНЕННЫХ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ЗАСЫПНЫХ АППАРАТОВ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ**

Обоснованы условия повышения эффективности механической обработки контактных поверхностей с износостойкими наплавочными материалами конусов и чаш засыпных аппаратов доменных печей. Экспериментально доказана эффективность применения процесса шлифования по сравнению с процессом точения. Теоретически обоснована целесообразность применения глубинного продольного шлифования с созданием начального натяга в технологической системе. Разработана эффективная технология круглого шлифования контактных поверхностей с износостойкими наплавочными материалами.

**Ключевые слова:** наплавочный материал, шлифование, точение, абразивный круг, резец, режим резания, упругое перемещение, производительность обработки, качество обработки

**Введение.** Эффективность работы засыпных аппаратов доменных печей во многом зависит от долговечности и надежности работы малых и больших конусов и чаш засыпных аппаратов, которые предназначены для выполнения функции распределения и шлюзования шихтовых материалов, а также газуплотнения колошника доменной печи. Вместе с тем, как показывает практика, они достаточно быстро выходят из строя. Низкая продолжительность

работы обусловлена интенсивным изнашиванием контактных рабочих поверхностей (поясов) от действия руды и агломератов, которые загружаются в доменную печь, а также от действия насыщенного абразивной пылью колошникового газа, который выходит из доменной печи. Повысить ресурс работы контактных поверхностей конусов и чаш можно путем наплавления на них износостойких материалов и обеспечения высокой точности сопрягаемых поверхностей. Благодаря упрочнению контактных поверхностей, удалось многократно повысить ресурс их работы. Однако при этом возникает чрезвычайно сложная задача механической обработки износостойких наплавочных материалов, поскольку их твердость достигает значений HRC 62 и более. Причем, данная задача возникает как на начальном этапе – после нанесения наплавочного материала на рабочую поверхность, так и на конечном этапе, когда необходимо удалить остатки изношенного слоя наплавочного материала для его повторного нанесения на рабочую поверхность, т.е. на этапе восстановления изношенной поверхности.

**Анализ последних исследований и литературы.** В настоящее время накоплен определенный опыт механической обработки контактных поверхностей конусов и чаш с износостойкими наплавленными материалами твердостью HRC 62 и более [1, 2]. Установлено, что применение процесса точения резцами из твердых сплавов и синтетических сверхтвердых материалов малоэффективно вследствие повышенного износа и низкой стойкости резцов. Поэтому обработка износостойких наплавочных материалов производится исключительно шлифованием абразивными кругами, работающими в режиме интенсивного износа и самозатачивания. Лишь обладая высокой режущей способностью, абразивный круг в состоянии производить съем данного труднообрабатываемого материала. При этом процесс шлифования характеризуется низкой производительностью. В результате обработка контактной поверхности конуса или чаши длится несколько рабочих смен с большим расходом абразивных кругов. Проблема обработки усугубляется еще и относительно большой неравномерностью снимаемого припуска, составляющего 3–7 мм на сторону. Все это в конечном итоге усложняет возможности повышения производительности и точности обработки, в особенности достижения высоких показателей точности формы поверхности при обработке крупногабаритных чаш и конусов диаметром до 5800 мм. Из этого следует, что проблема механической обработки контактных поверхностей конусов и чаш с износостойкими наплавленными материалами по-прежнему остается актуальной, требующей новых технологических решений.

**Цель исследования, постановка проблемы.** Целью работы является обоснование условий повышения эффективности механической обработки контактных поверхностей конусов и чаш с износостойкими наплавленными материалами на основе применения прогрессивных лезвийных и абразивных инструментов и рациональных режимов резания. Это позволит выбрать наиболее предпочтительный вариант механической обработки.

**Материалы исследования.** Для достижения поставленной цели были проведены сравнительные экспериментальные исследования процессов точения

и круглого шлифования контактных поверхностей конусов (диаметром 5400 мм) засыпных аппаратов доменных печей, восстановленных с применением износостойкого наплавочного материала Пл-Нп 500Х40НС2 РЦ-Б-С (ГОСТ 26467-85) твердостью HRC  $\geq 62$ . Его химический состав: С – 5,77%, Cr – 35,43%, Ni – 38,55%, Si – 2,8%, Mn – 1,09%, В – 0,31%, Zr – 0,29%. Снимаемый припуск составлял 5–7 мм на сторону. Для осуществления процесса точения использовались резцы из твердых сплавов и синтетических сверхтвердых материалов различных фирм-производителей:

- LNMХ301940–TWR TT8020 (фирма Taegu Tec, Южная Корея);
- LNUX301940–SN– DM6615 (PRAMET, Чехия);
- SNMH250924HV UE6010 (Mitsubishi, Япония);
- SNMG190616 IC907 (Iscar, Израиль);
- вставка оснащена СТМ (композит 10).

Точение резцами из твердых сплавов производилось на следующем режиме резания: скорость резания  $V=30$  м/мин; глубина резания  $t=1$  мм; подача  $S=0,2-0,3$  мм/об. Точение резцами из СТМ (композит 10) производилось с  $V=58$  м/мин;  $t=0,5$  мм;  $S=0,15-0,2$  мм/об, т.е. с меньшей производительностью обработки. Как установлено экспериментально, стойкость всех резцов из твердых сплавов оказалась приблизительно одинаковой, равной 25 минут, а стойкость резца из СТМ равна 20 минут. При этом установлено, что в процессе резания резец фирмы Taegu Tec подвергался равномерному изнашиванию, а на всех остальных резцах имели место сколы режущей кромки, которые собственно и определяли стойкость резцов.

Круглое наружное шлифование осуществлялось с использованием абразивных кругов: ПП 400х80х127 14А F40 СМК; ПП 400х80х127 54С F40 СМБ; ПП 400х80х127 25С F40 СМК. Режим шлифования: скорость вращения детали  $V_{dem}=23$  м/мин; поперечная подача  $S_{non}=0,05$  мм/дв. ход; продольная подача  $S_{prod}=40$  мм/мин (или  $S_{prod}=28$  мм/об). Шлифование производилось без применения смазочно-охлаждающей жидкости. Необходимо отметить, что режимы резания при точении и шлифовании были выбраны из условия примерно одинаковой производительности обработки. Так, при точении она равна 9000 мм<sup>3</sup>/мин, а при шлифовании 15700 мм<sup>3</sup>/мин.

Экспериментальные исследования процесса шлифования показали, что наилучшие результаты достигаются при использовании абразивного круга ПП 400х80х127 14А F40 СМК. Его стойкость до полного износа составила 8 часов. Из этого вытекает, что стойкость резцов из твердых сплавов несоизмеримо меньше стойкости абразивного круга ПП 400х80х127 14А F40 СМК. Следовательно, расходы, связанные с износом резцов (в зависимости от их стоимости), могут превышать расходы, связанные с износом и потреблением абразивных кругов. Поэтому с этой точки зрения применение процесса шлифования более эффективно, чем процесса точения. Этим можно объяснить то, что в настоящее время на предприятиях, занимающихся обработкой контактных (рабочих) поверхностей больших и малых конусов и чаш засыпных аппаратов доменных печей, применяется круглое наружное и внутреннее

шлифование, хотя и оно осуществляется с относительно низкой производительностью.

На наш взгляд, основной причиной низкой производительности круглого шлифования по жесткой схеме [3] является низкая жесткость технологической системы, в результате чего возникают значительные упругие перемещения:

$$y = y_{уст} \cdot (1 - \varepsilon^{-n}), \quad (1)$$

где  $y_{уст} = B_1 \cdot t$  – упругое перемещение при установившемся во времени процессе шлифования, м;

$\varepsilon = 1 + 1/B_1$  – уточнение на проходе круга (равное отношению погрешностей обработки на предыдущем и последующем проходах круга);

$n$  – количество проходов круга;

$$B_1 = \frac{\sigma \cdot H \cdot V_{дет}}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}$$

$\sigma$  – условное напряжение резания (энергоёмкость обработки), Н/м<sup>2</sup>;

$$K_{ш} = P_z / P_y;$$

$P_z, P_y$  – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н;

$c$  – жесткость технологической системы, Н/м;

$H$  – ширина шлифования, м;

$V_{кр}$  – скорость круга, м/с;

$t$  – номинальная глубина шлифования, м.

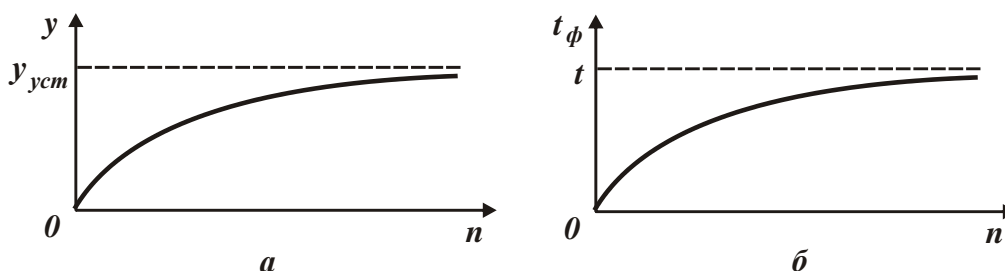


Рис. – Зависимости: а – упругого перемещения  $y$ ; б – фактической глубины шлифования  $t_{\phi}$  от количества проходов круга  $n$

Как следует из рисунка, полученного на основе зависимости (1), с увеличением  $n$  величина  $y$  увеличивается, асимптотически приближаясь к значению  $y_{уст}$ , который может во много раз превышать номинальную глубину шлифования  $t$ . Так, теоретически установлено, что для относительно небольшой жесткости технологической системы безразмерный параметр  $B_1 > 1$ , а для большой жесткости  $B_1 < 1$ . Чтобы ускорить процесс при шлифовании в случае  $B_1 > 1$  (рисунок), необходимо в технологической системе создать начальный натяг, равный  $y_{уст}$ . Это позволит существенно повысить производительность обработки. В этом случае фактическая глубина шлифования  $t_{\phi}$  будет равна  $t$  (рисунок) и шлифование по жесткой схеме обеспечит постоянство во времени производительности обработки, определяемой из условия

$$y_{уст} = B_1 \cdot t = \frac{\pi \cdot D_{дет} \cdot S_{прод} \cdot \sigma \cdot t}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}, \quad (2)$$

где  $D_{дет}$  – диаметр детали, м;

$S_{прод}$  – скорость продольной подачи, м/с.

Откуда

$$Q = \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot y_{уст}}{\sigma}. \quad (3)$$

Производительность обработки тем больше, чем больше параметры  $y_{уст}$ ,  $c$ ,  $V_{кр}$  и  $K_{ш}/\sigma$ . Естественно, увеличивая  $y_{уст}$ , можно существенно увеличить производительность обработки  $Q$ . Однако, как известно, существует предельная производительность обработки, определяемая прочностными свойствами рабочей поверхности круга, превышение которой приводит к интенсивному износу круга, а возможно и к потере его режущей способности. Существенным ограничением производительности обработки является также возбуждение в технологической системе интенсивных колебаний вследствие трения связки круга с обрабатываемым материалом [4]. Поэтому для эффективного ведения процесса шлифования необходимо обработку производить с оптимальной производительностью, при которой круга работает в режиме равномерного износа и самозатачивания. Работа круга в режиме затупления требует его периодической правки, что не всегда эффективно. Работа круга в режиме самозатачивания также способствует уменьшению энергоемкости обработки  $\sigma$  и увеличению коэффициента  $K_{ш} = P_z/P_y$ , что обеспечивает уменьшение величины  $y_{уст}$  и соответственно снижение силовой напряженности процесса резания, т.к. тангенциальная составляющая силы резания  $P_z = \sigma \cdot Q / V_{кр}$  будет уменьшаться при заданной производительности обработки. Из этого вытекает, что лишь обеспечивая высокую режущую способность круга, выражающуюся в снижении  $\sigma$  и увеличении коэффициента  $K_{ш} = P_z/P_y$ , можно добиться уменьшения силовой и тепловой напряженности процесса шлифования и соответственно повышения точности и качества обрабатываемых поверхностей. Практическим воплощением данного теоретического решения может быть применение высокопористых крупнозернистых абразивных кругов, работающих в режиме интенсивного самозатачивания и характеризующихся высокой режущей способностью.

В случае круглого продольного шлифования  $Q = \pi D_{дет} \cdot S_{прод} \cdot t$ . Исходя из полученной зависимости, для заданной (предельной) производительности обработки  $Q$  шлифование можно производить по двум схемам: обычного многопроходного шлифования и глубинного шлифования. В первом случае обработка производится с небольшой глубиной шлифования  $t$  и повышенной скоростью продольной подачи  $S_{прод}$ . Во втором случае, наоборот, с небольшой  $S_{прод}$  и увеличенной глубиной шлифования  $t$ . В двух случаях эффект обработки будет один и тот же, т.к. реализуется одна и та же производительность обработки  $Q$ . Вместе с тем, увеличение  $S_{прод}$  предполагает увеличение скорости детали  $V_{дет}$ , а это, как известно, ведет к увеличению средней толщины среза и при шлифовании обеспечивается работа круга в режиме самозатачивания, что

важно с точки зрения уменьшения энергоемкости обработки  $\sigma$ . В связи с этим, целесообразно обработку производить по схемам многопроходного шлифования с увеличенными значениями  $S_{\text{прод}}$ ,  $V_{\text{дет}}$  и небольшой  $t$ .

В общем случае

$$V_{\text{дет}} = S_{\text{прод}} \cdot \frac{\pi \cdot D_{\text{дет}}}{S},$$

где  $S$  – продольная подача, м/об.

Как видно, скорость детали  $V_{\text{дет}}$  зависит от соотношения  $S_{\text{прод}}/S$ . Одно и то же значение  $V_{\text{дет}}$  можно достичь за счет пропорционального увеличения параметров  $S_{\text{прод}}$  и  $S$ , что имеет место для рассмотренного выше случая. То же значение  $V_{\text{дет}}$  можно достичь за счет пропорционального уменьшения параметров  $S_{\text{прод}}$  и  $S$ . Очевидно, уменьшение  $S_{\text{прод}}$ , согласно приведенной зависимости, предполагает увеличение  $t$  с целью обеспечения постоянства  $Q$ . Таким образом, с одинаковой эффективностью одну и ту же производительность обработки  $Q$  можно реализовать при одном значении  $V_{\text{дет}}$ , но разных значениях  $S_{\text{прод}}$  и  $t$ . При небольшом значении  $S_{\text{прод}}$  и увеличенном значении  $t$  реализуется схема глубинного шлифования, а при увеличенном значении  $S_{\text{прод}}$  и небольшой глубине шлифования  $t$  реализуется схема многопроходного шлифования. Как известно, схема многопроходного шлифования характеризуется большим вспомогательным временем обработки, поэтому с этой точки зрения целесообразно использовать схему глубинного шлифования с весьма малой  $S_{\text{прод}}$  и увеличенной  $V_{\text{дет}}$ . В принципе к такому же результату можно прийти, используя схему многопроходного шлифования последовательными врезаниями – с радиальной подачей уступами. В этом случае.  $Q = H \cdot V_{\text{дет}} t$ .

При относительно небольшой глубине шлифования, т.е. в условиях многопроходного шлифования, можно реализовать достаточно большие значения  $V_{\text{дет}}$ , что будет способствовать работе круга в режиме самозатачивания, обеспечивая его высокую режущую способность и снижение энергоемкости обработки  $\sigma$ . Это в свою очередь, приведет к снижению силовой и тепловой напряженности шлифования, повышению качества обрабатываемых поверхностей.

**Результаты исследований.** В работе установлено, что для эффективного ведения процесса круглого шлифования можно использовать схему глубинного продольного шлифования с небольшой или схему многопроходного шлифования последовательными врезаниями – с радиальной подачей уступами. Обе схемы целесообразно осуществлять с увеличенными значениями  $V_{\text{дет}}$ . Данные схемы успешно реализованы на операциях круглого шлифования малых и больших конусов и чаш засыпных аппаратов доменных печей в производственных условиях [5]. Обработка производится на токарно-карусельном станке, оснащенный шлифовальной головкой, установленной на суппорте станка. Для обработки используются абразивные круги из электрокорунда нормального (14А) на бакелитовой связке ВФ (усиленной стекловолокном) крупной зернистости: 16–22 (по FEPA размер зерна

1,6–0,8 мм відповідно) ПП 500×63×203 14А СТ2 ВФ. Эта связка характеризується більшою хрупкістю і забезпечує більш високу режущу здатність круга завдяки реалізації роботи круга в режимі інтенсивного самозатачивання. Режимы шлифования:  $t = 0,1 \dots 0,2$  мм;  $V_{дет} = 50 \dots 120$  м/мин;  $S_{прод} < 42$  мм/мин (долевая продольная подача  $S_{\delta} < 0,1$ ). По суті, реалізована схема круглого продольного глибокого шлифования з заданим натягом в технологічній системі. В результаті забезпечується шероховатість поверхності при попередньому шлифованні –  $R_a = 1,2 \dots 1,7$  мкм, при остаточному шлифованні –  $R_a = 0,6 \dots 0,8$  мкм, що відповідає вимогам на обробку. Забезпечуються також потрібні показники якості і точності оброблюваних поверхностей при остаточному шлифованні. Загальна трудомісткість обробки зменшена в 2 рази порівняно з раніше застосованою технологією звичайного багатопрохідного шлифования.

**Висновки.** Проведені порівняльні експериментальні дослідження процесів точіння і шлифования контактних поверхностей з зносостійкими наплавочними матеріалами і доведена ефективність застосування процесу шлифования. Обґрунтована цілесамостійність застосування схеми глибокого продольного шлифования з створенням початкового натягу в технологічній системі. Розроблена ефективна технологія круглого шлифования контактних поверхностей з зносостійкими наплавочними матеріалами, забезпечуюча підвищення продуктивності, точності і якості обробки.

**Список литературы:** 1. Рыжов Э.В. Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями / Э.В. Рыжов, С.А. Клименко, О.Г. Гуцаленко. – К.: Наук. думка, 1994. – 180 с. 2. Рыбицкий В.А. Опыт внедрения алмазного шлифования деталей с защитными покрытиями / В.А. Рыбицкий. – К.: Общество «Знание» УССР, 1987. – 23 с. 3. Новиков Ф.В. Расчет и анализ закономерностей изменения величины упругого перемещения при шлифовании с течением времени обработки / Ф.В. Новиков, И.А. Рябенков // Резание и инструмент в технологических системах: междунар. науч.-техн. сб. – 2008. – Вып. 75. – С. 299-305. 4. Иванов И.Е. Повышение производительности обработки при круглом шлифовании крупногабаритных деталей / И.Е. Иванов // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. – «Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні». – 2011. – Вип. 115. – С. 86-90. 5. Новиков Ф.В. Перспективные направления повышения эффективности обработки при круглом шлифовании наплавленных контактных поверхностей конусов и чаш засыпных аппаратов / Ф.В. Новиков, В.А. Андилахай // Защита металлургических машин от поломок. – Мариуполь. – 2011. – Вып. 13. – С. 193-201.

*Надійшла до редколегії 29.10.2013р.*

УДК 621.923

**Технологическое обеспечение качества упрочненных контактных поверхностей элементов засыпных аппаратов доменных печей / Иванов И. Е., Новиков Ф. В., Дитиненко С. А. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 42(1015). – С. 77–84. Библиогр.: 5 назв.**

Обґрунтовано умови підвищення ефективності механічної обробки контактних поверхонь зі зносостійкими наплавочними матеріалами конусів і чаш засипних апаратів доменних печей. Експериментально доведена ефективність застосування процесу шлифування в порівнянні із процесом точіння. Теоретично обґрунтована доцільність застосування глибокого поздовжнього шлифування зі створенням початкового натягу в технологічній системі. Розроблено ефективну технологію круглого шлифування контактних поверхонь зі зносостійкими наплавочними матеріалами.

**Ключові слова:** наплавочний матеріал, шліфування, точіння, абразивний круг, різець, режим різання, пружне переміщення, продуктивність обробки, якість обробки.

Substantiates efficiency machining of contact surfaces with wear-resistant coating materials cones and bowls of blast furnace charging devices. Experimentally proved the effectiveness of the grinding process compared with the process of turning. Theoretically proved the feasibility of deep longitudinal sanding with the creation of the initial tension in the technological system. Efficient technology is developed cylindrical grinding contact surfaces with wear-resistant coating materials.

**Keywords:** filler, grinding, turning, grinding wheel, cutter, cutting mode, elastic movement, processing performance, the quality of treatment.

УДК 621.983

**О. В. КАЛЮЖНИЙ**, канд. техн. наук, доц., НТУУ «КПІ», Київ

### **ЗМЕНШЕННЯ ЗУСИЛЛЯ ТА ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ФОРМОУТВОРЕННЯ ПРИ КОМБІНОВАНОМУ ВИТЯГУВАННІ ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ ВИРОБІВ**

В статті розглянуто порівняльний розрахунковий аналіз процесів комбінованого витягування вісесиметричних виробів в двоконусній матриці та в матриці спеціального профілю. Методом скінченних елементів створені математичні моделі витягування. Адекватність моделей підтверджена існуючими експериментальними даними по витягуванню в двоконусній матриці. Використання матриці спеціального профілю дозволило знизити зусилля формоутворення та величини розтягувальних осьових напружень в стінці заготовки завдяки зменшенню впливу тертя при витягуванні. Зменшення напружень приводить до збільшення ступеню деформації при потонненні і висоти виробу, який отримується за один перехід

**Ключові слова:** комбіноване витягування, двоконусна матриця, матриця спеціального профілю, метод скінченних елементів, зусилля витягування, кінцеві розміри виробів.

**Вступ.** Витягування порожнистих виробів з листових заготовок – широко розповсюджена формоутворююча операція листового штампування. Традиційне витягування вісесиметричних виробів з круглої заготовки, рекомендації по визначенню параметрів для проектування технології, які викладені в джерелах [1-4], вже не відповідають вимогам сучасного виробництва, як по продуктивності штампування так і по точності форми і розмірів виробів. Використання комбінованого витягування в одноконусній і двоконусній матрицях дозволяє збільшити глибину витягування за один перехід та підвищити точність виробів завдяки потонненню стінки при формоутворенні виробів (рис. 1) [5]. Сутність комбінованого витягування в двоконусних матрицях полягає у розподілі формоутворення виробу на дві стадії. Перша стадія починається деформуванням плоскої листової заготовки 1 діаметром  $D_3$  в верхньому конусі (під кутом  $\alpha$ ) матриці 2 з подальшим витягуванням заготовки в робочий конус (під кутом  $\beta$ ) за допомогою пуансону 3 діаметром  $D_p$ . Після першої стадії утворюється конічна чашка. Друга стадія реалізується витягуванням чашки в робочий поясок матриці 2, який має діаметр  $D_m$ . Напружено-деформований стан заготовки при комбінованому витягуванні в двоконусній матриці з різними кутами  $\alpha$  досліджено в роботі [6]. Встановлені величини кутів, які забезпечують мінімальні величини