

УДК 621.961.1.001

Сычук Ю. Т.
Чигиринский В. В.**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В ЗОНЕ БЛЕСТЯЩЕГО ПОЯСКА ПРИ ПРОБИВКЕ ГОРЯЧЕКАТАНОЙ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ РИФЛЕННЫМИ ПУАНСОНАМИ**

Наличие в конструкциях автомобильной, тракторной и сельскохозяйственной техники значительной номенклатуры силовых деталей, штампуемых из горячекатаных листовых сталей повышенной толщины, вызывает необходимость обеспечения высокой износостойкости разделительных штампов. В связи с этим проблема повышения стойкости указанных штампов является актуальной задачей.

Одним из способов повышения износостойкости разделительных штампов является придание рационального макрорельефа их рабочей поверхности [1, 2]. В работах [2, 3] показано влияние макрогеометрии рабочей части пробивных пуансонов в виде совокупности регулярно повторяющихся продольных рифлений на силовой режим и величину зоны пластических деформаций, определяющие нагрузку на режущие кромки пуансонов. При этом не рассматривалось влияние указанной макрогеометрии на деформированное состояние вдоль поверхности разделения и размеры блестящего пояска при пробивке, а также их взаимосвязь с силовыми затратами и износостойкостью пробивных пуансонов.

Целью работы является исследование деформированного состояния в зоне разделения при пробивке горячекатаной малоуглеродистой стали шлифованным и рифлеными пуансонами для определения условий образования блестящего пояска и скалывающихся трещин, снижения технологических усилий и связанного с этим повышения износостойкости пуансона.

Указанные исследования проводились при пробивке образцов горячекатаной стали марки Ст3 кп/пс толщиной 3 мм. Механические свойства указанной стали приведены в табл. 1 ($\sigma_{0,2}$ – предел текучести, σ_B – предел прочности, δ_5 – относительное удлинение).

Таблица 1

Механические свойства стали Ст3кп/пс

Стандарт	$\sigma_{0,2}$	σ_B	δ_5
ГОСТ 380-2005	МПа		%
	260	430	30

В качестве рабочего инструмента при эксперименте применялись пробивные пуансоны $\varnothing 9,1$ мм с продольными рифлениями на боковой поверхности рабочей части, а также шлифованные пробивные пуансоны.

Рифленая боковая поверхность рабочей части пробивных пуансонов представляла собой совокупность регулярно повторяющихся выступов и впадин, ориентированных вдоль оси пуансона. Торцевая поверхность рабочей части рифленых пуансонов оставалась шлифованной.

Для характеристики профиля рифлений на боковой поверхности рабочей части пробивных пуансонов (рис. 1) был применен предложенный авторами [4] обобщенный показатель X^* , более полно отражающий состояние рабочей поверхности пуансонов, чем первоначально принятый для этой цели шаг рифлений t .

Предложенный обобщенный показатель X^* учитывает соотношение участков выступов и впадин, а также углы и глубины впадин рифлений на боковых поверхностях рабочей части пробивного пуансона:

$$X_* = 1 - \left(\frac{P}{t}\right) \operatorname{tg} \alpha \quad (1),$$

где t – шаг рифлений;
 p и 2α – глубина и угол впадин рифлений;
 l – длина стороны впадин рифлений.

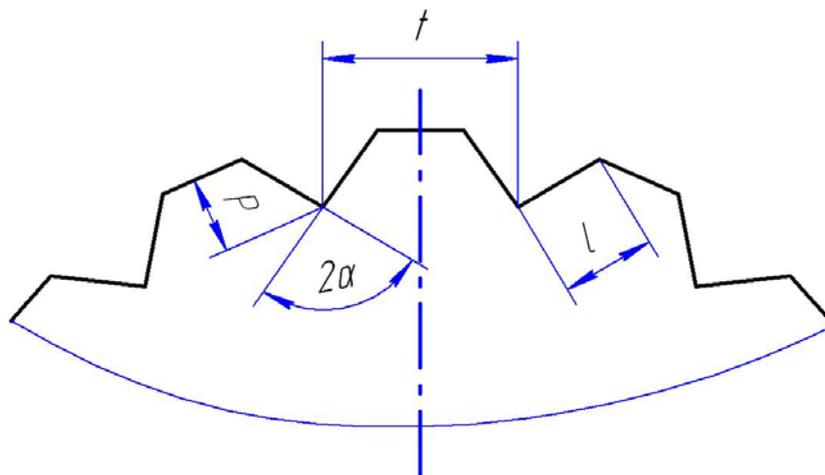


Рис. 1. Профиль рифлений на боковой поверхности рабочей части пробивного пуансона

Обобщенный показатель X_* применяемых при эксперименте рифленых пуансонов составил 0,52...0,54 и 0,68...0,72. Случай, при котором $X_* = 1$, соответствовал пуансону со шлифованной рабочей поверхностью. Параметры рабочей поверхности рифленых пуансонов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры рабочей поверхности рифленых пробивных пуансонов

X_*	t , мм	P , мм	2α , град	l , мм
0,52...0,54	0,4	0,18...0,19	90	0,25...0,27
0,68...0,72	0,6	0,17...0,19	90	0,24...0,27

При исследованиях деформированного состояния применялись составные образцы $\varnothing 36$ мм, состоящие из 2-х полудисков с координатной сеткой в виде наколов алмазной пирамидой на их диаметральной плоскость. Параметры координатной сетки, схема ее нанесения и составной образец в сборе приведен на рис. 2.

Поэтапная пробивка образцов осуществлялась без прижима в лабораторном штампе [5] на кривошипном прессе мод. К2326 усилием 400 кН до момента образования скалывающей трещины от режущей кромки пуансона. Величина двустороннего технологического зазора составляла 15 % толщины пробиваемой заготовки.

При определении компонент деформированного состояния в объемах заготовки, контактирующих с выступами и впадинами рифлений, изменялась ориентировка плоскости с координатной сеткой каждого последующего образца (от совпадения последней с серединой угла впадин до совпадения ее с серединой площадки выступа рифления). Схема ориентировки плоскости разреза составных образцов с координатной сеткой относительно профиля рифления приведена на рис. 3. Для оценки деформированного состояния при пробивке шлифованным пуансоном составной образец располагался таким образом, чтобы плоскость разреза с координатной сеткой ориентировалась по нормали к боковой поверхности рабочей части пуансона.

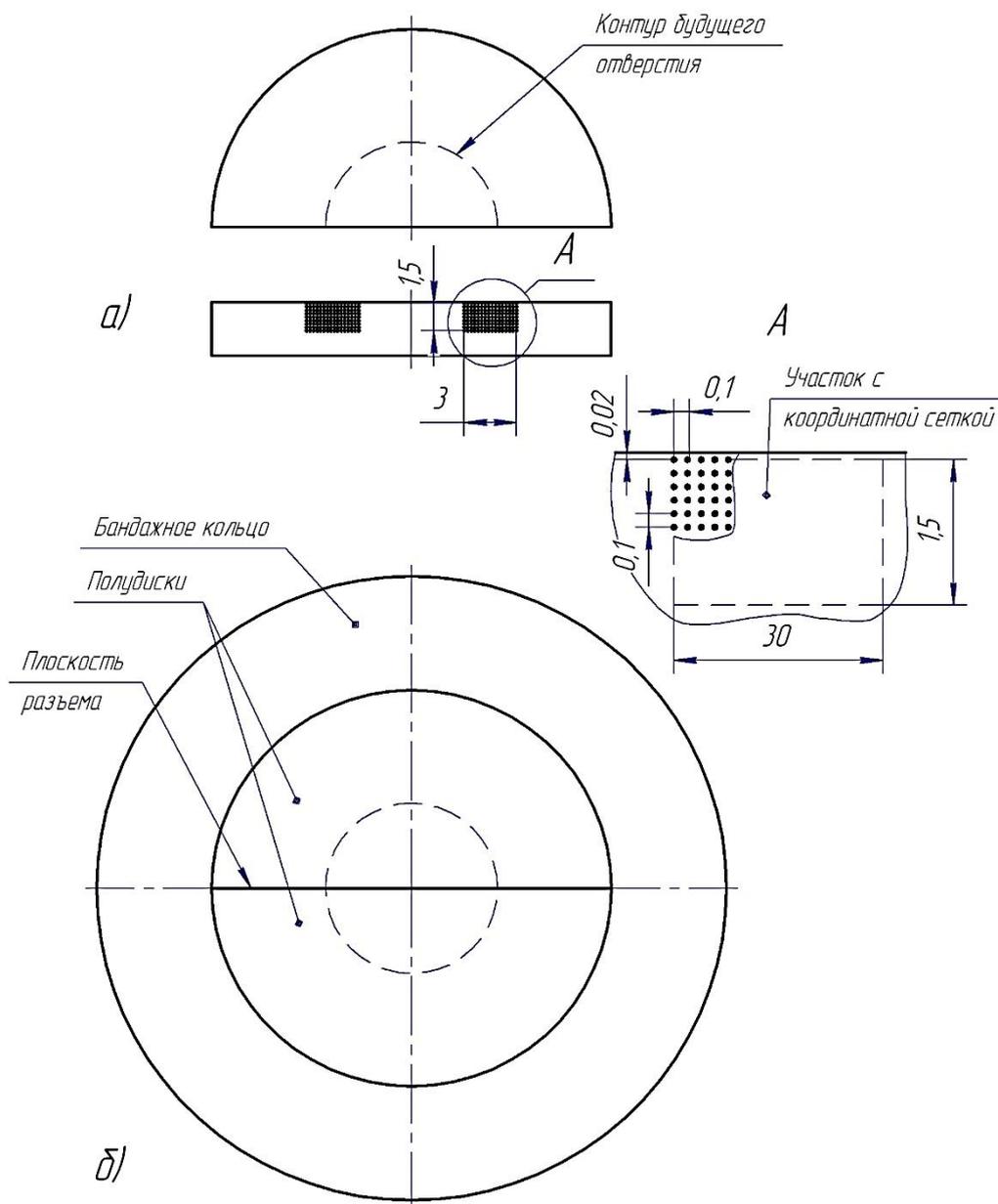


Рис. 2. Схема нанесения координатной сетки на полудиски (а) и составной образец в сборе (б)

Расчет приращения главных деформаций $\Delta l_1, \Delta l_2, \Delta l_3$, приращения интенсивности деформаций ΔI_i , величины накопленной деформации $\bar{\varepsilon}_i$ и показателя вида деформированного состояния ν_ε проводился по известным формулам, приведенным в работах [6, 7].

Математическая обработка результатов исследования деформированного состояния пробиваемых образцов выполнялась на ЭВМ в среде «MathCAD» и «Turbo Basic».

Геометрические параметры блестящего пояска в пробитых отверстиях определялись на полудисках составных образцов, деформированных рифлеными и шлифованными пуансонами до момента образования трещин скола, а также на цельных дисках $\varnothing 36$ мм, пробитых при ранее проведенных исследованиях силового режима [2]. Последние разрезались и обрабатывались по диаметральной плоскости. После этого измерялись параметры пробитых отверстий, приведенные на рис. 4: высота утяжки h_{yu} и блестящего пояска h_{mi} при пробивке шлифованным пуансоном; высота утяжки у выступа рифления h_{yp} и во впадине рифления h_{yv} , высота блестящего пояска в указанных зонах – соответственно h_{np} и h_{nv} , а также фиксировался момент зарождения трещин скола.

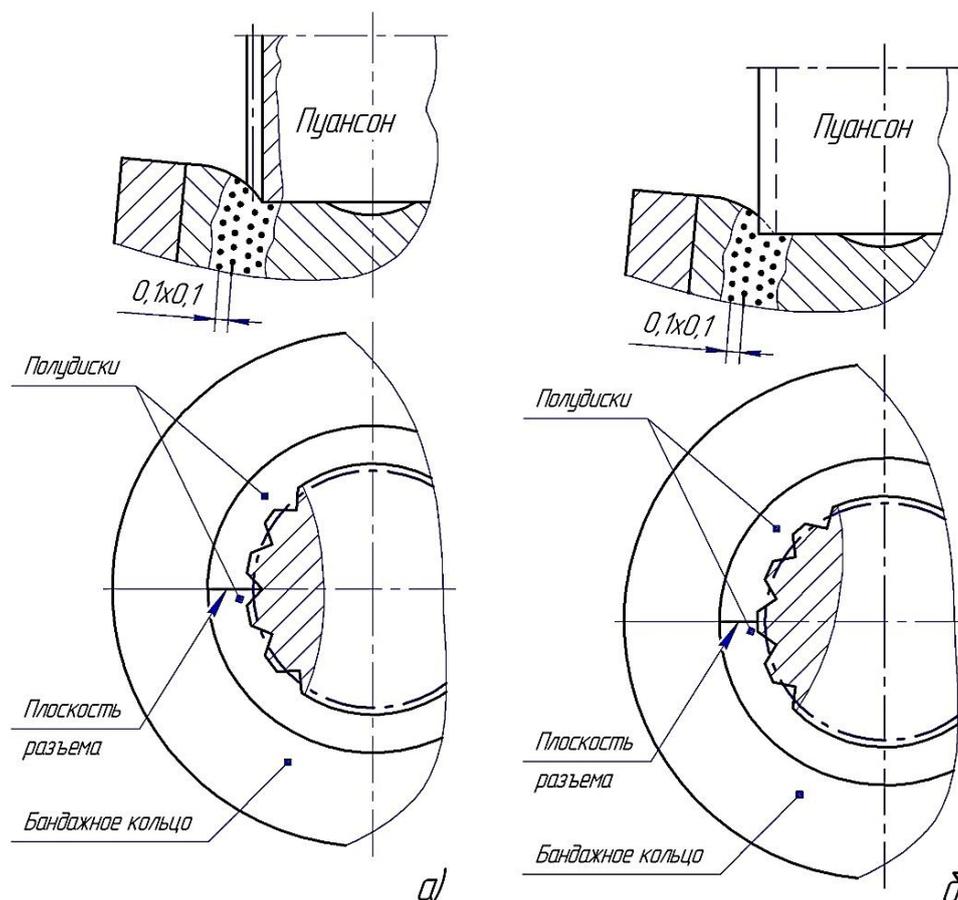


Рис. 3. Схема ориентировки плоскости разъема составных образцов с координатной сеткой относительно профиля рифления:

а – через середину угла впадины рифления; б – через середину площадки выступа рифления

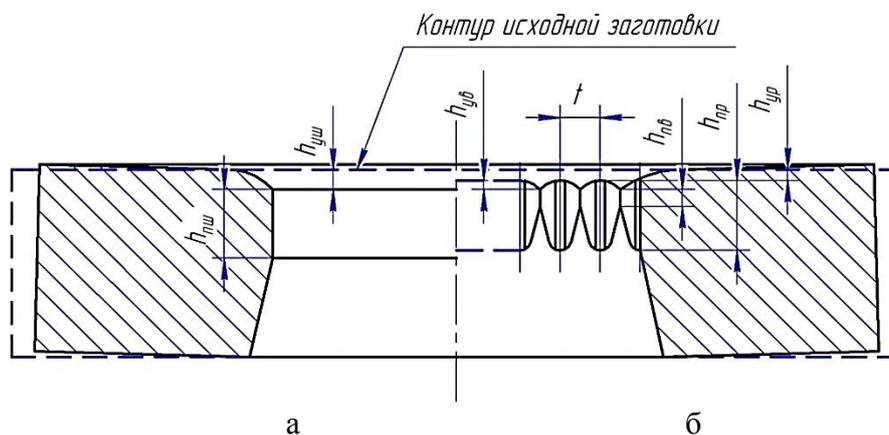


Рис. 4. Геометрические параметры отверстия, пробитого шлифованным (а) и рифленым (б) пуансонами

Геометрические параметры пробитых отверстий и силовые затраты при пробивке рифлеными и шлифованными пуансонами приведены в табл. 3.

Анализ контура блестящего пояса при пробивке рифлеными пуансонами показал образование дополнительной утяжки $h_{ув}$ в объемах заготовки, примыкающих к внутренним углам впадин рифлений и первоначальное образование трещин скола в указанных зонах заготовки. Отмеченное первоначальное образование трещин скола объясняется следующим. Растягивающие напряжения, обусловленные изгибом заготовки из-за технологического зазора, суммируются с дополнительными растягивающими напряжениями, вызванные утяжкой $h_{ув}$

в зонах заготовки, примыкающих к внутренним углам впадин рифлений. Реализующаяся в указанных зонах пробиваемой заготовки разноименная объемная схема напряженного состояния, характеризующая наличием двух сжимающих и одного (суммарного) растягивающего напряжения, известна [6, 8, 9], как менее благоприятная для пластической деформации.

Таблица 3

Геометрические параметры пробитых отверстий и силовые затраты при пробивке рифлеными и шлифованными пуансонами

X^*	t , мм	h_{yp} , мм	$h_{yв}$, мм	h_{np} , мм	$h_{нв}$, мм	$h_{yш}$, мм	$h_{нш}$, мм	F , мм ²	P_n , кН	P_c , мм
0,52...0,54	0,4	0,1	0,2	0,99	0,35	–	–	29,4	27,6	2,07
0,68...0,72	0,6	0,07	0,23	0,72	0,16	–	–	26,2	25,2	1,9
1,0	–	–	–	–	–	0,14	1,15	32,9	30,0	2,25

Преобладание влияния растягивающих напряжений в зонах пробиваемой заготовки, примыкающих к впадинам рифлений, подтверждается показателем вида деформированного состояния ν_ε в указанных зонах заготовки. Так, при пробивке образцов рифленым пуансоном с $X^* = 0,68...0,72$ показатель вида деформированного состояния ν_ε в ячейке координатной сетки, примыкающей к внутреннему углу впадины рифления, составил $\nu_\varepsilon = -0,513$, т. е. растяжение. В следующей ячейке координатной сетки, примыкающей к торцевой поверхности указанного пуансона, показатель вида деформированного состояния составил $\nu_\varepsilon = -0,204$, т. е. сдвиг, смежный с растяжением. Такое различие вида деформированного состояния в рядом расположенных объемах заготовки, пробиваемой рифленым пуансоном с $X^* = 0,68...0,72$, обусловило образование между ними скалывающихся трещин. При этом образование трещин скола произошло уже при рабочем ходе, равном 15 % толщины заготовки и интенсивности деформации $\varepsilon_i = 0,38$, тогда как при пробивке шлифованным пуансоном трещины скола образуются при значительно большем рабочем ходе пуансона h_{px} , интенсивности деформации ε_i , а также вида деформированного состояния $\nu_\varepsilon = 0,407$ (сдвиг, смежный со сжатием). Высота блестящего пояска при пробивке рифленым пуансоном с $X^* = 0,68...0,72$ в зоне, контактирующей с внутренним углом впадины рифления h_{ep} , составила 4...6 % толщины заготовки.

Сравнение показателя вида деформированного состояния ν_ε вдоль профиля рифления при пробивке пуансоном с $X^* = 0,68...0,72$ показало изменение ν_ε от -0,513 (растяжение) в объемах заготовки, примыкающих ко впадине рифления, до $\nu_\varepsilon = 0,525$ (сжатие) в зонах контакта с площадкой выступа рифления. Наличие деформаций сжатия в зоне контакта с площадкой выступа рифления вызывает увеличение пластической деформации в указанной зоне, вследствие чего трещины скола от выступов рифлений в этом случае образуются при рабочем ходе пуансона, равном 26...27 % толщины заготовки.

При пробивке образцов рифленым пуансоном с $X^* = 0,52...0,54$ отмечено некоторое снижение деформационных растяжений в зоне контакта заготовки с внутренним углом впадины рифления ($\nu_\varepsilon = -0,504$) и увеличение деформаций сжатия в зоне заготовки, примыкающей к площадке выступа рифления ($\nu_\varepsilon = 0,592$). Это проявилось в увеличении по сравнению с $X^* = 0,68...0,72$ высоты блестящего пояска (32...33 % толщины заготовки) в зоне, примыкающей к площадке выступа рифления.

Неодновременность образования блестящего пояска и скалывающихся трещин вдоль периметра рифленого пуансона иллюстрируется переменной высотой блестящего пояска (максимальной – в зоне контакта заготовки с площадками выступов рифлений и минимальной –

в зоне контакта с внутренними углами впадин рифлений). Так, при пробивке пуансоном с $X^* = 0,68...0,72$ высота блестящего пояса h_{np} в зоне контакта с выступами рифлений составила 23...24 % толщины заготовки, а в зоне контакта с впадинами рифлений высота блестящего пояса $h_{пв}$ составила 4...6 % толщины заготовки. При пробивке образцов пуансонами с $X^* = 0,52...0,54$ высота блестящего пояса h_{np} в зоне контакта заготовки с выступами рифлений увеличилась до 32...33 % толщины заготовки, а в зоне контакта заготовки с внутренними углами впадин рифлений высота блестящего пояса $h_{пв}$ увеличилась до 10...13 % толщины заготовки.

Анализ результатов исследования деформированного состояния при пробивке шлифованным пуансоном показал следующее. Как известно, образование скалывающих трещин при пробивке шлифованным пуансоном происходит одновременно по всему периметру разделения. В этом случае образование скалывающих трещин начинается при большем рабочем ходе ($h_{px} = 40...42$ % толщины заготовки) и интенсивности деформаций $\overline{\varepsilon}_i = 1,16$, чем при пробивке рифлеными пуансонами.

При этом отмечены следующие значения показателя вида деформированного состояния V_{ε} в момент образования скалывающих трещин. В зоне, примыкающей к боковой поверхности шлифованного пуансона, V_{ε} составил -0,346, что соответствует сдвигу, смежному со сжатием. В зоне образования скалывающих трещин от режущей кромки шлифованного пуансона $v_{\varepsilon} = 0,407$, т. е. сдвиг, смежный со сжатием, что совпадает с результатами исследований, приведенных в работе [10]. При этом в указанной зоне отмечено наибольшее значение интенсивности деформаций $\overline{\varepsilon}_i$. В зоне контакта с торцом шлифованного пуансона показатель v_{ε} составил 0,394, т. е. сдвиг, смежный со сжатием.

Наибольшее значение интенсивности деформаций $\overline{\varepsilon}_i$ и высоты блестящего пояса обусловили в последнем случае повышение силовых затрат, а, следовательно, увеличение нагрузки на рабочие кромки шлифованного пуансона.

Наименьшая высота блестящего пояса, отмеченная при пробивке рифленым пуансоном с $X^* = 0,68...0,72$, объясняется оптимальным соотношением сжимающих деформаций в зонах контакта с площадками выступов рифлений и растягивающих деформаций в зоне контакта заготовки с вершинами углов впадин рифлений. Этот случай в исследуемом интервале значений X^* (от 0,52 до 1) характеризуется наименьшим значением площади блестящего пояса F и величиной усилий пробивки P_n и съема P_c .

Полученные результаты исследований использовались для применения пуансонов с рифленой рабочей частью при изготовлении деталей «Лонжерон рамы», «Стойка надставного борта прицепа», «Пластина крепления двери», «Усилитель рычага задней подвески», «Пластина переднего сидения», «Пластина транспортера», «Накладка шкворня поворотного кулака верхняя», «Фланец тормозного барабана» и ряда других деталей.

В результате применения рифленых пуансонов достигнуто снижение износа их рабочей части в 3–5 раз при устранении налипания металла заготовки на рабочую часть пуансонов, обеспечение необходимых технологических и эксплуатационных характеристик штампуемых деталей, повышение производительности труда за счет сокращения простоя оборудования из-за замены вышедших из строя пуансонов.

ВЫВОДЫ

Боковая поверхность рабочей части пробивных пуансонов в виде совокупности регулярно повторяющихся продольных выступов и впадин создает неравномерное вдоль профиля рифлений напряженно-деформированное состояние пробиваемой заготовки.

Отмеченная неравномерность напряженно-деформированного состояния обусловила первоначальное образование скалывающих трещин в зоне контакта заготовки с внутренними углами впадин рифлений. При пробивке рифлеными пуансонами с $X^* = 0,68...0,72$ скалывающие

трещины в указанной зоне образуются уже при рабочем ходе пуансона равном 15 % толщины заготовки. При пробивке шлифованными пуансонами начало образования скалывающихся трещин происходит при рабочем ходе пуансона равном 40...42 % толщины заготовки.

Более раннее по сравнению с пробивкой шлифованным пуансоном и одновременное вдоль профиля рифления при $X^* = 0,68...0,72$ образование скалывающихся трещин привело к переменной высоте и уменьшению на 20 % площади блестящего пояска, что характеризовалось в этом случае снижением усилия пробивки на 16...22 %, а усилия съема – в среднем на 20 %. Этим объясняется снижение зависящих от этих усилий бокового и торцевого износа рифленых пуансонов по сравнению со шлифованными при промышленных испытаниях их износостойкости.

Одновременное по периметру шлифованного пуансона образование скалывающихся трещин (рабочий ход пуансона равный 40...42 % толщины заготовки) происходит при повышенных по сравнению с пробивкой рифленным пуансоном высоты блестящего пояска и интенсивности деформаций. Это обусловило увеличение силовых затрат, а, следовательно, повышенную нагрузку на рабочие кромки шлифованного пуансона.

Площадь блестящего пояска и силовые затраты при пробивке рифленным пуансоном с $X^* = 0,52...0,54$ по абсолютному значению занимают промежуточное положение между указанными параметрами при пробивке рифленным пуансоном с $X^* = 0,68...0,72$ и шлифованным пуансоном.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимощенко В. А. *Повышение износостойкости разделительных штампов* / В. А. Тимощенко // *Кузнечно-штамповое производство. Обработка материалов давлением. – 2000. – № 12. – С. 22–24.*
2. Сычук Ю. Т. *Влияние параметров процесса пробивки рифлеными пуансонами на силовые затраты и коэффициенты геометрической точности деталей* / Ю. Т. Сычук, В. В. Чигиринский, Ю. И. Нагорный // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні : науч. журн. – Запоріжжє : ЗНТУ, 2011. – № 2. – С. 60–65.*
3. Сычук Ю. Т. *Исследования механизма разделения при пробивке горячекатаной малоуглеродистой стали рифлеными пуансонами* / Ю. Т. Сычук, В. В. Чигиринский // *Вестник НТУ «ХПИ» : сб. науч. тр. : Тематический выпуск : Новые решения в современных технологиях. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2011. – № 46. – С. 77–82.*
4. Нагорный Ю. И. *Расчет работы разделения при пробивке рифленным пуансоном* / Ю. И. Нагорный, Ю. Т. Сычук, С. З. Юдович // *Изв. ВУЗов. – М. : изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1990. – № 2. – С. 91–94.*
5. А. с. 416125 СССР, М.Кл.В21с51/00. *Устройство к штампу для измерения усилий на пуансоне* / С. З. Юдович, Л. И. Живов, Б. Н. Чумаков, Ю. Т. Сычук, В. И. Дубина, Ю. А. Фурманов, В. А. Глазков (СССР). – № 17640447/25-27 ; заявл. 28.03.72 ; опубл. 25.02.74, Бюл. № 7. – 3 с.
6. Михаленко Ф. П. *Стойкость разделительных штампов* / Ф. П. Михаленко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1986. – 224 с.
7. Смирнов-Аляев Г. А. *Сопrotивление материалов пластическому деформированию* / Г. А. Смирнов-Аляев. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1978. – 368 с.
8. Бер В. И., Макушок Е. М., Суяров Д. И. // *Известия АН БССР. – 1981. – № 1. – С. 6–10. – (Сер. «Физ.-техн. наук»).*
9. Попов В. А. *Основы теории листовой штамповки* / В. А. Попов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1977. – 278 с.
10. Смирнов-Аляев Г. А. *Холодная штамповка в приборостроении* / Г. А. Смирнов-Аляев, Д. А. Вайнтрауб. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машигиз, 1963. – 436 с.

Сычук Ю. Т. – инженер ЗНТУ;

Чигиринский В. В. – д-р техн. наук, проф., зав. каф. ЗНТУ.

ЗНТУ – Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье.

E-mail: valerij@zntu.edu.ua