МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND THEORETICAL ENGINEERING

УДК 621.983+665.33 DOI: 10.17213/1560-3644-2021-1-43-49

ВЛИЯНИЕ ВОДОРАСТВОРИМОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕВИТАМЕТАЛЛИЗАНТА РВ-18 НА ВЕЛИЧИНЫ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ГЛУБОКОЙ ВЫТЯЖКЕ ЛИСТОВЫХ СТАЛЕЙ

© 2021 г. Г.И. Шульга[1], А.О. Колесниченко[1], Е.В. Скринников[1], И.Ю. Лебединский[1], Т.Г. Шульга[2]

[1]Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия,
[2]ООО РКК «Мегаполис», г. Ростов-на-Дону, Россия

INFLUENCE OF WATER-SOLUBLE TECHNOLOGICAL REVITAMETALLIZANT RV-18 ON VALUES OF VOLTAGES AT DEEP DRAWING OF SHEET STEELS

G.I. Shulga[1], A.O. Kolesnichenko[1], E.V. Skrinnikov[1], I.Yu. Lebedinskiy[1], T.G. Shulga[2]

[1]Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia,
[2]LLC RCC «Megapolis», Rostov-on-Don, Russia

Шульга Геннадий Иванович – д-р техн. наук, профессор, кафедра «Автомобили и транспортно-технологические комплексы», Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия. E-mail: g.shulga@mail.ru

Колесниченко Алексей Олегович – ст. преподаватель, кафедра «Автомобили и транспортно-технологические комплексы», Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия. E-mail: akoles19@rambler.ru

Скринников Евгений Валерьевич – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Общеинжнерные дисциплины», Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия. E-mail: skrinnikov08@mail.ru

Лебединский Илья Юрьевич – аспирант, кафедра «Автомобили и транспортно-технологические комплексы», Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия. E-mail: ilialebedinski@gmail.ru

Шульга Татьяна Геннадьевна – канд. техн. наук, ген. директор ООО РКК «Мегаполис», г. Ростов-на-Дону, Россия. E-mail: t.shulga@mail.ru

Shulga Gennadiy I. – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department «Automobiles and Transport-Technological Complexes», Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia. E-mail: g.shulga@mail.ru

Kolesnichenko Alexey O. – Senior Lecturer, Department «Automobiles and Transport-Technological Complexes», Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia. E-mail: akoles19@rambler.ru

Skrinnikov Evgeniy V. – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Head of Department «General Engineering Disciplines», Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia. E-mail: skrinnikov08@mail.ru

Lebedinskiy Il`ya Yu. – Graduate Student, Department «Automobiles and Transport-Technological Complexes», Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia. E-mail: ilialebedinski@gmail.ru

Shulga Tatiyana G. – Candidate of Technical Sciences, General Director of LLC RCC «Megapolis», Rostov-on-Don, Russia. E-mail: t.shulga@mail.ru

Разработано водорастворимое технологическое смазочное средство – ревитаметаллизант РВ-18, которое повышает долговечность штампового инструмента, снижает силовые параметры технологического процесса глубокой вытяжки листовых сталей и улучшает качество обрабатываемых поверхностей.

Процесс глубокой вытяжки листовых сталей характеризуется растягивающими меридиональными напряжениями, сжимающими широтными напряжениями, касательными напряжениями, вызванными силами трения, напряжением текучести.

Триботехнологии глубокой вытяжки листовых сталей с использованием ревитаметаллизанта РВ-18 в программной системе конечно-элементного анализа ANSYS Workbench позволяют определять напряжения, деформации, производить оптимизацию данных процессов, повышать качество и эксплуатационные характеристики получаемых изделий.

При оптимизации процесса глубокой вытяжки листовых сталей в программном комплексе ANSYS Workbench по изменению предела текучести листовых сталей при использовании ревитаметаллизанта РВ-18 оценена его эффективность; по эпюрам распределения напряжений определены области на листовой заготовке, соответствующие максимальным и суммарным напряжениям; определены суммарные и максимальные напряжения при тангенциальных деформациях в образце.

Ключевые слова: ревитаметаллизант; глубокая вытяжка; листовая сталь; меридиональное, широтное, касательное напряжения; деформация; машина трения.

The water-soluble technological lubricant - revitametallizant RV-18 increases the durability of the stamping tool, reduces the power parameters of the deep drawing process of sheet steel and improves the quality of the processed surfaces.

The deep drawing process of sheet steel is characterized by tensile meridian stresses, compressive latitudinal stresses, shear stresses caused by frictional forces, and yield stress. Calculation of these stresses at various stages of the technological process is a difficult task.

The tribotechnologies of deep drawing of sheet steel using the PB-18 revitametallizer in the ANSYS Workbench finite element analysis software make it possible to determine stresses, strains, optimize these processes, and improve the quality and performance of the resulting products.

When optimizing the process of deep drawing of sheet steels in the ANSYS Workbench software package, it was possible to: by changing the yield strength of sheet steels when using technological lubricants to judge their effectiveness; using the stress distribution diagrams to determine the areas on the sheet blank corresponding to the maximum and total stresses; determine the total and maximum stresses, with tangential deformations in the sample.

Keywords: revitametallizant; deep drawing; sheet steel; meridional, latitudinal, shear stress; deformation; friction machine.

Введение

В современном машиностроении находит широкое распространение получение осесимметричных деталей из листовых сталей с использованием малоотходных технологических процессов штамповки и вытяжки. Данная проблема решается разработкой и использованием водорастворимого технологического смазочного средства – ревитаметаллизанта РВ-18, повышающего долговечность штампового инструмента, снижающего силовые параметры технологического процесса и улучшающего качество обрабатываемых поверхностей [1 – 6]. Триботехнологии глубокой вытяжки и штамповки листовых сталей с использованием ревитаметаллизанта РВ-18 в программной системе конечно-элементного анализа *ANSYS Workbench* [7] позволяют определять напряжения, деформации, производить оптимизацию данных процессов, повышать качество и эксплуатационные характеристики получаемых изделий.

Целью исследования является определение напряжений при вытяжке цилиндрических осесимметричных заготовок с использованием ревитаметаллизанта РВ-18 в программной системе конечно-элементного анализа *ANSYS Workbench.*

Задача исследования – оценка влияния ревитаметаллизанта РВ-18 на напряжения в заготовке при глубокой вытяжке листовых сталей.

При описании предельного состояния глубокой вытяжки приемлемы гипотезы постоянства касательных напряжений и постоянства энергии формообразования – энергетическое условие Мизеса-Генки [2, 8, 9]. Для протекания пластического формообразования фланца заготовки необходимо, чтобы соотношения между напряжениями соответствовали условиям пластичности Убера-Мизеса [2, 8]:

$$/\sigma_\rho/ + /\sigma_\theta/ = \beta \cdot \sigma_s ,$$

где β – коэффициент Лоде (β = 1…1,15); σ_ρ – растягивающие меридиональные напряжения, Н/мм^2;

σ_θ – сжимающие широтные напряжения, Н/мм^2; σ_s – напряжение текучести, действующее нормально к серединной поверхности, Н/мм^2.

Равновесие элемента осесимметричной заготовки при вытяжке цилиндрического участка заготовки при наличии трения [8] показано на рис. 1, где τ_{pz} – касательные напряжения, вызванные действием сил трения, направленных по касательной к меридиану, Н/мм^2; R_ρ и R_θ – радиусы кривизны срединной поверхности в меридиональном и широтном сечениях, мм; ρ – радиус, характеризующий расстояние рассматриваемого элемента от оси симметрии; α – угол между касательной к серединной поверхности в меридиональном сечении и осью симметрии.

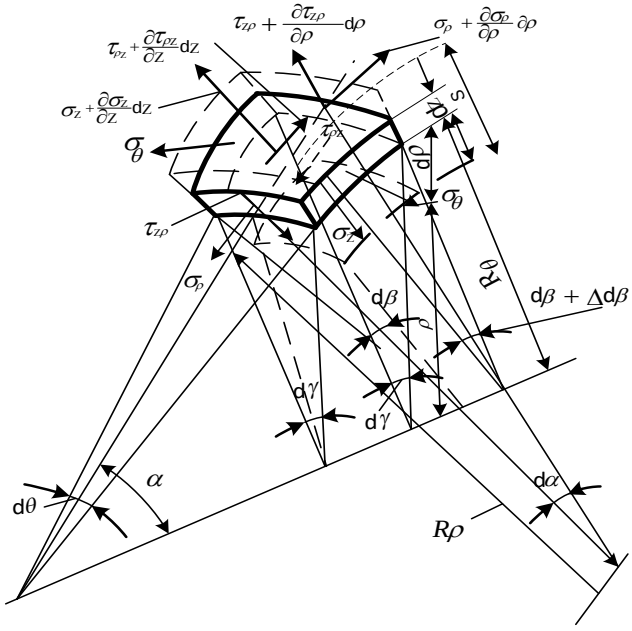


Рис. 1. Равновесие элемента осесимметричной заготовки при вытяжке цилиндрического участка при наличии трения / Fig. 1. Equilibrium of an axisymmetric workpiece element when stretching a cylindrical section in the presence of friction

Принято, что касательные напряжения на контактной поверхности удовлетворяют зависимости Кулона ($\tau_к = \mu \cdot \sigma_к$), т.е. пропорциональны нормальному контактному напряжению с коэффициентом пропорциональности, равным коэффициенту трения. Нормальные σ_z и касательные τ_{pz} напряжения линейно убывают по мере удаления от контактной поверхности до нуля на свободной поверхности.

В уравнении равновесия, когда контактное напряжение создается не только напряжениями σ_ρ, σ_θ, но и действием прижима, а трущимися поверхностями являются обе поверхности заготовки, учитывается влияние усилия q, создаваемого внешними силами [8]:

$$\rho \cdot \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta - \frac{\mu \cdot \rho}{\sin\alpha} \cdot \left(\frac{2q}{S} + \frac{\sigma_\rho}{R_\rho} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta} \right) = 0.$$

На элементарный объем при вытяжке цилиндрического участка действуют растягивающие меридиональные напряжения σ_ρ, которые должны быть меньше напряжения текучести деформируемого материала заготовки ($\sigma_\rho < \sigma_s$). При невыполнении данного условия происходит утонение стенки, завершающееся отрывом дна. На элементарный объем донной части заготовки действуют растягивающие меридиональные σ_ρ и сжимающие широтные σ_θ напряжения, которые всегда меньше напряжения текучести деформируемой заготовки:

$$\sigma_\rho < \sigma_s,\ \sigma_\theta < \sigma_s.$$

Максимальное растягивающее напряжение $\sigma_{\rho\max}$, Н/мм^2, действующее на границе пластически деформируемой части заготовки с учетом влияния изгиба на радиусе матрицы $r_м$, мм, радиусе пуансона $r_п$, мм, определяют [8] как

$$\sigma_{\rho\max} = \sigma_s \left(\ln\frac{R}{r} + \frac{\mu_{ср} \cdot Q}{\pi \cdot R \cdot S_1 \cdot \sigma_s} + \frac{S_1}{2 \cdot r_м + S_1} \right) \times$$
$$\times \left(1 + 1{,}6 \cdot \mu_3\right) + \sigma_s \left(\frac{S_1}{4 \cdot r_п + 2 \cdot S_1} \right) \left(1 + 1{,}6 \cdot \mu_6\right), \quad (1)$$

где R – радиус заготовки, мм; S_1 – толщина заготовки, мм; r – радиус вытяжного стакана, мм; Q – усилие прижима, Н.

Коэффициенты трения в формуле (1): μ_1 – между плоским прижимом и плоской заготовкой; μ_2 – между плоской заготовкой и плоскостью матрицы; μ_3 – между радиусом заготовки и радиусом матрицы; μ_6 – между радиусом пуансона и радиусом матрицы; $\mu_{ср} = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2}$ – средний коэффициент трения трибосопряжений при прижиме заготовки.

Максимальное усилие вытяжки, Н [8]:

$$P_{\max} = \pi \cdot d \cdot S_1 \cdot \sigma_{\rho\max},$$

где d – диаметр вытяжного стакана, мм.

Максимальное усилие прижима, Н [8]:

$$Q = 0{,}1 \cdot [1 - 18 \cdot k \cdot S_1 / (k-1) \cdot D] \cdot k^2 P_{\max},$$

где $k = D/d = R/r$, D – исходный диаметр заготовки, мм; S_1 – толщина заготовки, мм.

Из формулы (1) следует, что коэффициенты трения оказывают влияние на $\sigma_{\rho\max}$. Причем с увеличением коэффициентов трения в сопряжениях напряжение в опасном сечении возрастает.

Для улучшения условий вытяжки необходимо применение технологических смазочных материалов, обеспечивающих минимальные значения коэффициентов трения.

Важным элементом при использовании системы конечно-элементного анализа *ANSYS Workbench* является предварительное определение величины коэффициента трения между материалами деформируемого изделия и штамповым инструментом с применением технологических смазочных материалов [2].

Методика эксперимента

Сравнительная оценка эффективности 40 %-го водного раствора РВ-18 с добавкой 2 % нанопорошка меди, смазочного материала ШС-2М ТУ 0254-044-23763315-2006, масла касторового технического ГОСТ 6757-96 при вытяжке листовых сталей проведена на машине гидравлической для испытания технологических свойств листового металла МТЛ-10Г-1 [2]. Испытания проведены при следующих режимах: изменение нагрузки при вытяжке 0,3 – 10 тс, скорость перемещения пуансона 4,0 – 24,0 мм/мин, диапазон перемещения пуансона 20,0 мм. Результаты технологических испытаний при выдавливании стали 08Ю приведены в табл. 1.

Таблица 1/ Table 1

Сравнительные испытания технологических смазочных материалов / Comparative tests of technological lubricants

Смазочный материал	$P_м$, кН	$P_{ρ\ max}$, кН	$H_{г\ в.}$, мм	ΔD, мм
40 %-й водный раствор ревитаметаллизанта *РВ*-18 с добавкой 2 % нанопорошка меди	31,5	51,00	13,62	1,45
ШС-2М ТУ 0254-044-23763315-2006	30,8	49,28	13,21	1,5
Масло касторовое техническое ГОСТ 6757-96	30,7	49,12	13,25	1,4

В качестве деформируемых заготовок использовали образцы из листовых сталей: Ст3кп, 08кп, 08Ю диаметром 48 мм, толщиной 0,8 – 3 мм. Физико-механические свойства данных листовых сталей приведены в табл. 2.

Таблица 2/ Table 2

Физико-механические свойства листовых сталей / Physical and mechanical properties of sheet steel

Материал	Плотность, г/см^3	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона	Предел текучести, МПа
Ст3кп ГОСТ 16523-97	7,85	208	0,26	195
08кп ГОСТ16523-97	7,87	203	0,26	196
08Ю ГОСТ 9045-93	7,8	200	0,26	195

В качестве критериев оценки эффективности технологических материалов использованы: $P_м$ – усилие, соответствующее пределу текучести образца из листовой стали, кН; $P_{р\ max}$ – максимальное усилие разрыва образца из листовой стали, кН; $H_{г\ в}$ – глубина вытяжки смазанных образцов, мм; ΔD – разность диаметров заготовки и фланца, мм [2].

Для оптимизации технологического процесса глубокой вытяжки листовых сталей с использованием водорастворимого технологического ревитаметаллизанта РВ-18 с добавками нанопорошков цветных металлов определен коэффициент трения матрицы штампового инструмента из стали 40Х и листовой стали 08Ю. Испытания на торцевой машине трения 40 %-го водного раствора смазочного материала РВ-18 без добавок и с добавками 1 – 2 % нанопорошков меди, цинка показали изменение величины коэффициента трения μ пары 40Х – сталь 08Ю с 0,12 до 0,16 при удельных нагрузках p = 30...100 МПа. Коэффициент трения μ = 0,15…0,16 принят в компьютерной модели в системе *ASYS Workbench* при получении осесимметричных деталей листовой вытяжкой.

Сравнительными испытаниями технологических смазочных материалов на машине гидравлической для испытания листового металла МТЛ-10Г-1 (см. табл. 1) установлено, что 40 %-й водный раствор РВ-18 с добавкой 2 % нанопорошка меди показал лучшие результаты по критериям эффективности по сравнению со смазочными материалами штамповочным ШС-2М ТУ 0254-044-23763315-2006 и техническим касторовым маслом ГОСТ 6757-96.

Геометрические параметры модели штампового инструмента для глубокой вытяжки листовых сталей с прижимом приведены на рис. 2. Основными элементами конструкции штампового инструмента являются: матрица *1*; заготовка *2*, прижимаемая к матрице прижимом *3* прижимным усилием $P_{пр}$; пуансон *4*, поступательно перемещающийся с постоянной скоростью, на который действует усилие вытяжки $P_{вып}$.

Задачу оптимизации процесса глубокой вытяжки в программном комплексе *ANSYS Workbench* решена при помощи модуля *Static Structural Analysis Systems*. Учет свойств листовых сталей: Ст3кп, 08кп, 08Ю и задание их линейных и нелинейных свойств выполнены при помощи функции *Engineering Data*. Физико-механические свойства материалов заданы пара-

метрами: плотность, модуль упругости Юнга, коэффициент Пуассона, предел текучести (см. табл. 2).

Все трибосопряжения в модели заданы типом связи *Frictional* с заданными коэффициентами трения, полученными экспериментально и равными 0,28…0,32 для случая без применения смазочного материала и 0,15 … 0,16 в случае использования ревитаметаллизанта *РВ*-18.

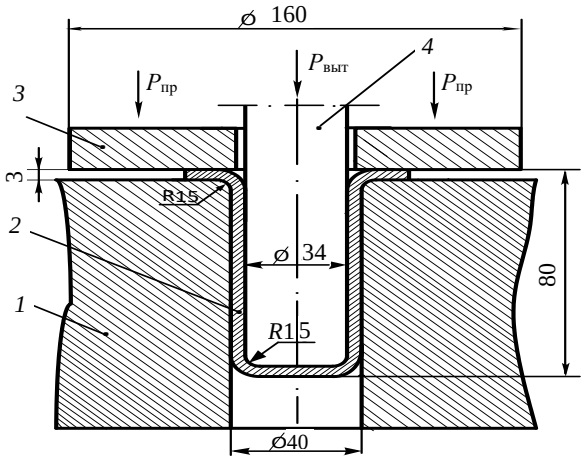


Рис. 2. Геометрические параметры модели штампового инструмента для глубокой вытяжки листовых сталей с прижимом: *1* – матрица; *2* – заготовка; *3* – прижим; *4* – пуансон / Fig. 2. Geometrical parameters of the model of a stamping tool for deep drawing of sheet steel with a clamp: *1* – matrix; *2* – blank; *3* – clamp; *4* – punch

Процесс глубокой вытяжки моделировался при следующих условиях и ограничениях: заготовка имеет шесть степеней свободы, контактирует с матрицей и прижимом, усилие на прижиме постоянное, начиная с нулевого шага интегрирования, и равно 2058 Н (полное 4116 Н); прижим имеет только одну поступательную степень свободы вдоль оси; пуансон имеет одну поступательную степень свободы вдоль оси и перемещается с постоянной скоростью 20 мм/мин.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Моделирование проведено с целью выявления суммарных растягивающих напряжений в заготовке и пройденного пуансоном расстояниия до разрыва заготовки без использования смазочного материала и с использованием ревитаметаллизанта РВ-18. Разрыв фиксировали на графике изменения максимальных напряжений в образце. Результаты исследований проанализированы по максимальному суммарному растягивающему напряжению (*Equivalent Stress*).

На рис. 3 приведены в программном комплексе *ANSYS Workbench* изменения суммарных растягивающих напряжений по времени в заготовке из листовых сталей Ст3кп, 08кп, 08Ю толщиной 2 мм при глубокой вытяжке листовых сталей с фланцем: без смазочного материала (кривая *1*) и с использованием 40 %-го водного раствора ревитаметаллизанта РВ-18 (кривая *2*).

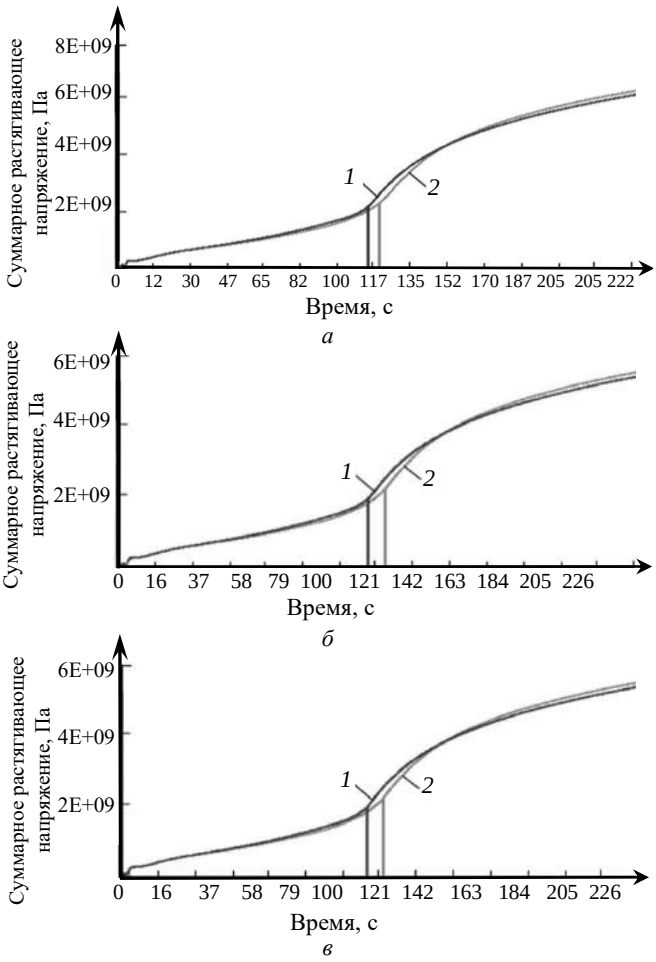
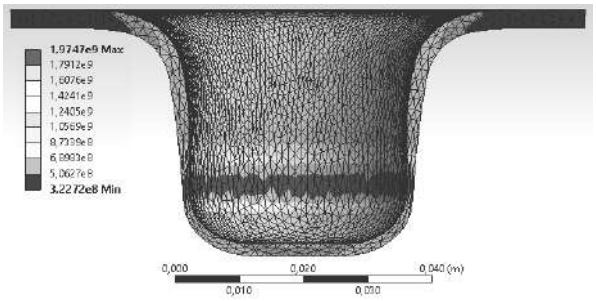


Рис. 3. Изменение суммарных растягивающих напряжений в заготовке из листовых сталей по Мизесу (*Equivalentvon Mizes Stress*) во времени при глубокой вытяжке листовых сталей с фланцем: *а* – Ст3кп; *б* – 08кп; *в* – 08Ю; *1* – без использования смазочного материала; *2* – с использованием смазочного материала 40 %-го водного раствора ревитаметаллизанта РВ-18 / Fig. 3. Change in total tensile stresses in a billet made of sheet steel according to Von Mizes (Equivalent von Mizes Stress) with time during deep drawing of sheet steel with a flange: *а* – St3bl; *б* – 08bl; *в*– 08Yu; *1* – with out use; *2* – with using – 40 % aqueous solution of revitametallizant RV-18

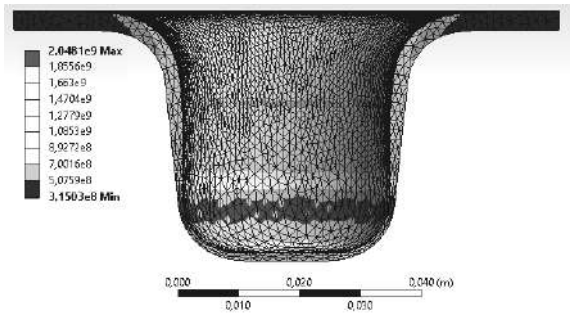
Как следует из рис. 3, величина предела текучести данных сталей при вытяжке заготовок с фланцем и с использованием 40 %-го водного раствора ревитаметаллизанта РВ-18 увеличивается. По изменению предела текучести листовых сталей при использовании технологических смазочных материалов можно судить об их эффективности.

На рис. 4 приведены эпюры распределения суммарных растягивающих напряжений в заго-

товке из листовой стали 08Ю в момент разрыва. Минимальные напряжения при сжатии заготовки прижимом без использования смазочного материала составили 3,2272 e8 Па, с использованием 40 %-го водного раствора ревитаметаллизанта РВ-18 с добавкой 2 % нанопорошка меди 3,1503 e8 Па, а максимальные растягивающие напряжения перед разрывом соответственно составили 1,9747 e9 и 2,0481 e9 Па на цилиндрической части заготовки.



а



б

Рис. 4. Эпюры распределения суммарных напряжений по Мизесу (*Equivalent von Mizes Stress*) в заготовке из листовой стали 08Ю в момент разрыва: *а* – без смазочного материала; *б* – с использованием 40 %-го водного раствора ревитаметаллизанта РВ-18 с добавкой 2 % нанопорошка меди / Fig. 4. Diagrams of the distribution of total stresses according to von Mizes (Equivalent von Mizes Stress) in a billet from sheet steel 08Yu at the moment of rupture: *a* – without lubricant; *б* – using a 40 % aqueous solution of revitametallizant RV-18 with the addition of 2 % copper nanopowder

Примечание: на рис. 3, *а* обозначение 2E+09 соответствует 2.10^9 Па, на рис. 4, *а* обозначение 1,9747e9 соответствует $1{,}9747.10^9$ Па.

В результате расчетов для всех исследуемых сталей выявлено не только увеличение предела текучести листовых сталей, но и уменьшение толщины дна цилиндра деформируемой заготовки и времени движения пуансона до разрыва заготовки, которое составило 115…122 с, что соответствует дополнительному перемещению пуансона с 38,3 до 40,6 мм.

На рис. 5 приведено изменение растягивающих максимальных и суммарных напряжений, а на рис. 6 изменение напряжений при тангенциальных деформациях максимальных и суммарных в образце из листовой стали 08Ю в процессе вытяжки по времени с использованием 40 %-го водного раствора ревитаметаллизанта РВ-18 с добавкой 2 % нанопорошка меди.

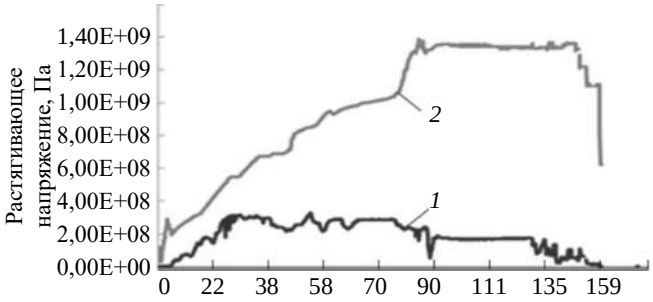


Рис. 5. Изменение напряжений в образце из листовой стали 08Ю в процессе вытяжки по времени с использованием 40 %-го водного раствора ревитаметаллизанта *РВ*-18 с добавкой 2 % нанопорошка меди: *1* – максимальных; *2* – суммарных / Fig. 5. Changes in stresses in a specimen made of sheet steel 08Yu in the course of drawing over time using a 40 % aqueous solution of revitametallizant RV-18 with the addition of 2 % copper nanopowder: *1* – maximum; *2* – total

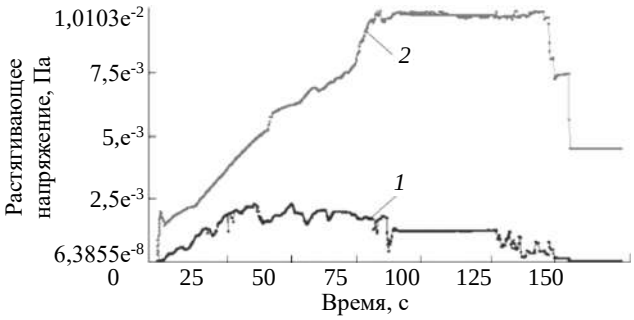


Рис. 6. Изменение напряжений при тангенциальных деформациях в образце из листовой стали 08Ю в процессе вытяжки по времени 40 %-го водного раствора ревитаметаллизанта РВ-18 с добавкой 2 % нанопорошка меди: *1* – максимальных; *2* – суммарных / Fig. 6. Changes in stresses at tangential deformations in a specimen made of sheet steel 08Yu during drawing in time of a 40 % aqueous solution of revitametallizant RV-18 with the addition of 2 % copper nanopowder: *1* – maximum; 2 – total

Примечание: на рис. 6 обозначение 7,5e-3 соответствует $7{,}5{\cdot}10^{-3}$ Па.

По графикам можно судить о величине напряжений на различных участках деформируемой заготовки.

Выводы

Таким образом, при оптимизации процесса глубокой вытяжки листовых сталей в программном комплексе *ANSYS Workbench* возможно:

– по изменению предела текучести листовых сталей при использовании технологических смазочных материалов сделать выводы об эффективности смазочного действия смазочных материалов;

– по эпюрам распределения напряжений при глубокой вытяжке листовой заготовки определить напряжения на различных участках заготовки, оптимизировать процесс глубокой вытяжки, регулируя усилием прижима, химическим составом используемого листового материала и толщиной заготовки;

– определить суммарные и максимальные напряжения, при растяжении и тангенциальных деформациях в заготовке в процессе глубокой вытяжки осесимметричных деталей из листовых сталей.

Литература

1. *Чичинадзе А.В., Берлинер Э.М., Браун Э.Д.* [*и др*.]. Трение, износ и смазка / под ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение. 2003. 576 с.
2. *Шульга Г.И.* Функциональные водорастворимые технологические смазочные средства для обработки материалов: монография. Ростов н/Д: изд-во Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. 2004. 212 с.
3. *Шульга Г.И., Колесниченко А.О., Скринников Е.В., Шульга Т.Г.* Функциональные технологические смазочные материалы, структурированные нанопорошками цветных металлов, для повышения эффективности обработки деталей транспортных средств // Вестн. Донского гос. техн. ун-та. 2011. Т.11. № 10. С. 1867 – 1873.
4. *Shulga G.I., Kolesnichenko A.O., Sirotin P.V., Lebedyns'kyi I.Yu., Skrynnikov E.V., Vasilyev M.A.* Optimization of technology for production of products of deep drawing sheet steels with the use of lubricants in universal software system ANSYS workbench 01028. Published online: 07 November 2018. DOI: 10.1051/matecconf/201822601028.
5. *Shulga G.I., Kolesnichenko A.O., Skrynnikov E.V., Shulga T.G., Vasilyev M.A.* Assessment of integrated index of environmental units of the transport system 01027. Published online: 07 November 2018. DOI: 10.1051/matecconf/201822601027.
6. *Shulga G.I., Kolesnichenko A.O., Lebedinsky I.Yu.* Complex Method for Evaluating Lubricating Properties of Technological Tools and Stresses When Drawing Products from Sheet Steel. Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Vol. I. Lecture Notes in Mechanical Engineering. DOI: 10.1007/978-3-030-22041-9_121.
7. *Исаченков Е.И.* Контактное трение и смазки при обработке металлов давлением. М.:Машиностроение. 1978. 208 с.
8. Теория пластических деформаций металлов / Е.П. Уиксов, У. Джонсон, В.Л. Колмагоров и др. / под ред. Е.П. Уиксова, А.Г. Овчинникова. М.: Машиностроение. 1983 – 598 с.
9. *Бруяка В.А., Фокин В.Г., Солдусова Е.А., Глазунова Н.А., Адеянов И.Е.* Инженерный анализ в *ANSYS Workbench*: учеб. пособие. Самара: Самар. гос. техн. ун-т. 2010. Ч.1. 271 с.

References

1. Cichinadze A.V., Berliner E.M., Brown E.D. [et al.]. *Friction, wear and lubrication* / Ed. A.V. Chichinadze. M.: Mechanical engineering. 2003. 576 p.
2. Shulga G.I. *Functional water-soluble process lubricants for material handling*: monograph. Rostov on/D: Izv. universities. North Caucasus. region, 2004. 212 p.
3. Shulga G.I., Kolesnichenko A.O., Skrinnikov E.V., Shulga T.G. *Functional technological lubricants, structured with non-ferrous metal nanopowders, to improve the efficiency of processing vehicle parts* // Vestnik of Don State Technical University. 2011. Vol. 11. No. 10. Pp. 1867 – 1873.
4. Shulga G.I., Kolesnichenko A.O., Sirotin P.V., Lebedyns'kyi I.Yu., Skrynnikov E.V., Vasilyev M.A. *Optimization of technology for production of products of deep drawing sheet steels with the use of lubricants in universal software system ANSYS workbench* 01028. Published online: 07 November 2018. DOI: https://doi.org/10.1051/matecconf/201822601028.
5. Shulga G.I., Kolesnichenko A.O., Skrynnikov E.V., Shulga T.G., Vasilyev M.A. *Assessment of integrated index of environmental units of the transport system*. 01027. Published online: 07 November 2018. DOI: 10.1051/matecconf/201822601027.
6. Shulga G.I., Kolesnichenko A.O., Lebedinsky I.Yu. *Complex Method for Evaluating Lubricating Properties of Technological Tools and Stresses When Drawing Products from Sheet Steel. Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019*). Vol. I. Lecture Notes in Mechanical Engineering. DOI: 10.1007/978-3-030-22041-9_121.
7. Isachenkov E.I. *Contact friction and lubrication in metal forming.* M.: Mechanical Engineering. 1978, 208 p.
8. *The theory of plastic deformations of metals* / E.P. Wicks, U. Johnson, V.L. Kolmagorov [et al.] / Ed. E.P. Uiksova, A.G. Ovchinnikova. M.: Mechanical engineering. 1983. 598 p.
9. Bruyaka V.A., Fokin V.G., Soldusova E.A., Glazunova N.A., Adeyanov I.Ye. *Engineering analysis in ANSYS Workbench*; study guide. Samara: Samara State Technical University. 2010. Part 1. 271 p.

Поступила в редакцию / Received ***24 февраля 2021 г. / February 24, 2021***