

УДК 669.141.24

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.103.0.47

ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ЛИСТОВИХ ЗАГОТОВОК ІЗ ХОЛОДНОКАТАНИХ ДЕФОРМІВНИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

Дощечкіна І. В.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Розроблено режим швидкісного рекристалізаційного відпалу для підвищення технологічної пластичності за умови збереження міцності листових холоднокатаних заготовок із деформівних алюмінієвих сплавів, що не зміцнюються термічним обробленням.

Ключові слова: деформівні алюмінієві сплави, тонкий лист, швидкісний нагрів, рекристалізаційний відпал, нагартування, структура, механічні властивості, листове штампування, глибоке витягування.

Вступ

Алюмінієві сплави як конструкційний матеріал достатньо широко використовуються в багатьох галузях народного господарства (авіаційна і автомобільна промисловість, залізничний та водний транспорт, промислове й цивільне будівництво, машинобудування, хімічна та електротехнічна продукція, предмети домашнього споживання), про що свідчать значні темпи зростання кількості виробленого алюмінію та сплавів на його основі в розвинених країнах [1].

Одним із основних споживачів ефективного використання холоднокатаного листового прокату з деформівних алюмінієвих сплавів є транспортне машинобудування [2]. Застосування сплавів систем $Al - Mn$ та $Al - Mg$ для виготовлення деталей транспортних засобів дає змогу значно знизити вагу конструкції, що забезпечить підвищення її маневреності, а також скоротити витрати пального та кількість шкідливих викидів у атмосферу, отримати вироби ефективним високопродуктивним способом холодного штампування з якісною поверхнею та необхідними експлуатаційними властивостями, з тривалою гарантією від корозії.

Ускладнення конструкцій, збільшення експлуатаційних напружень, що діють на деталі та вузли транспортних машин, спричиняють усе більш високі вимоги до алюмінієвих деформівних сплавів, і щоб задовольнити їх, потрібно знаходити способи підвищення як технологічних, так і функціональних властивостей. Вирішення цього питання є актуальним, бо, як зазначено в роботі [1], «перспективними в післявоєнний період є проведення наукових досліджень щодо створення теоретичних і технологічних засад підвищення властивостей алюмінієвих сплавів».

Аналіз публікацій

Широке застосування алюмінієвих сплавів у транспортному машинобудуванні найбільш розвинених країн світу (близько 40 % від загального споживання [2]), обумовлено наявністю в них суттєвих переваг серед інших конструкційних матеріалів: мала густина, висока питома міцність, корозійна стійкість, гарна деформівність у холодному стані в процесі виготовлення виробів (особливо складної конфігурації), які добре піддаються подальшому кінцевому механічному обробленню та зварюванню [3].

Деформівні сплави $Al - Mn$ та $Al - Mg$ легко обробляються тиском і призначені для отримання холоднокатаних напівфабрикатів у вигляді листів, стрічок, смуг, труб [4]. Способом холодного листового штампування (або пресування) з них вгтовляють широку номенклатуру найрізноманітніших за призначенням і формою тонкостінних виробів будь-якої складності із дуже точними розмірами та гарною чистотою поверхні.

Для деформування в холодному стані важливо, щоб холоднокатаний лист мав високу технологічну пластичність, що на вітчизняних металургійних комбінатах забезпечується рекристалізаційним відпалом рулонного листа в ковпакових садових печах періодичної дії [5]. Однак такий відпал часто не забезпечує рівномірності властивостей уздовж довжини листів, якості їх поверхні, гарантованих технологічних властивостей заготовок і, як наслідок, погана їх штампованість і значний брак. Необхідно брати до уваги, що алюмінієві сплави мають доволі високу вартість (порівняно зі сплавами на основі заліза приблизно у п'ятеро дорожчі) і браковані заготовки спричиняють значні економічні втрати, бо методів покращення здатності

до деформування вже готового листа не існує. Садкові печі термічного оброблення рулонного прокату для покращення якості окремих заготовок із вже готового листа не придатні.

Крім того, нині, коли вироби набувають більш складної конфігурації, потребують точних розмірів, високої чистоти поверхні та зазнають більш жорстких умов експлуатації, споживач висуває підвищені вимоги до алюмінієвого прокату, які також не можуть бути реалізовані в процесі застосування ковпакового відпалу. Як свідчать літературні джерела і наш досвід [6–8], ефективним може бути використання швидкісного безперервного знеміцнювального термічного оброблення. У роботах доведено, що завдяки рівномірному швидкісному нагріванню метал набуває однорідної дрібнозернистої структури на всій довжині та ширині листа (смуги). Автори [6] показали, що середній розмір зерна в листах зі сплаву АД1, що були відпалені безперервним швидкісним способом, у 2,5 раза менший, ніж після відпалу в садових печах. Завдяки подрібненню зерна й суттєвому підвищенню пластичності після рекристалізаційного відпалу значно покращується штампування виробів.

В останні роки за кордоном у безперервних лініях термооброблення успішно використовують контактний спосіб нагріву й охолодження металу, але наведені в літературі температурно-часові параметри неперервного швидкісного або прискореного відпалу алюмінієвого тонколистового прокату та їх впливу на механічні та технологічні властивості металу дуже обмежені. Вирішення цього питання є актуальним і має безумовне практичне значення.

Мета та постановка завдання

Мета роботи – розробити режим швидкісного рекристалізаційного відпалу для підвищення технологічної пластичності за умови збереження міцності листових холоднокатаних заготовок із деформівних алюмінієвих сплавів і визначити ступінь деформації після відпалу для отримання напівнагартваного та нагартваного стану сплаву.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити конкретні завдання.

1. Дослідити формування структури та властивостей холоднокатаних деформівних алюмінієвих сплавів за умови різних режимів швидкісного рекристалізаційного відпалу із

застосуванням контактного нагріву та охолодження.

2. Визначити найменш енергоємні температурно-часові параметри відпалу заготовок із холоднокатаного прокату для отримання необхідного рівня механічних властивостей відповідно до технічних вимог споживача, які б забезпечили бездефектну їх деформівність і здатність до дуже глибокого витягування під час виготовлення виробів методом холодного штампування.

3. Рекомендувати ступінь деформації після відпалу з метою забезпечення напівнагартваного й нагартваного стану заготовок для виробів залежно від їх експлуатаційних умов та технічних вимог споживача до готової продукції.

Матеріал і методики досліджень

Об'єктом дослідження обрані тонколистові (завтовшки 1 мм) заготовки із холоднокатаних деформівних алюмінієвих сплавів АД1, АМц, АМг3.

Заготовки-стрічки піддавали швидкісному безперервному рекристалізаційному відпалу в агрегаті з теплообмінними контактними барабанами. Стрічка надходить у камеру печі, де послідовно обгинає два нагрітих барабани й у процесі контакту з гарячими поверхнями відпалюється, а на виході з печі охолоджується або на повітрі, або водоохолоджувальними роликками.

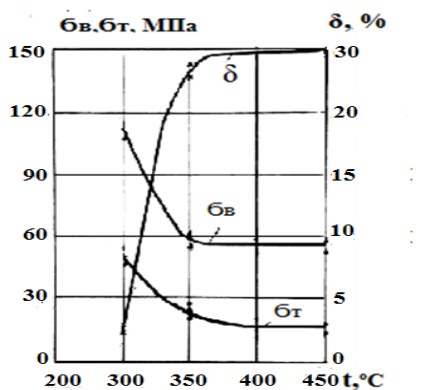
Метал нагрівався зі швидкістю 5 °С/с до температур від 250 до 400 °С з інтервалом у 50 °С. Витримування за температури нагріву тривало 5–15 хв, охолодження здійснювали на повітрі. Про якість проведеного відпалу свідчили результати металографічного аналізу та показники механічних властивостей. Стан поверхні перевіряли за показниками шорсткості. Здатність до витягування заготовок у різному стані оцінювали технологічною пробою за Еріксоном.

Основні результати досліджень

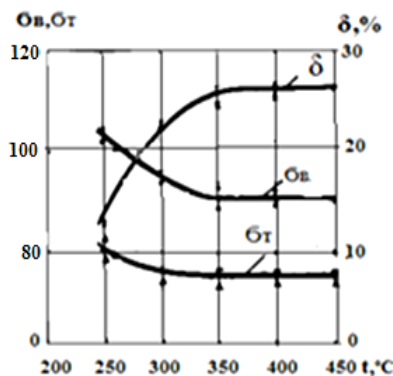
На рис. 1 наведені графіки залежності механічних властивостей алюмінієвих сплавів від температури нагріву.

Аналіз результатів дає змогу визначити температури відпалу, які забезпечують вимоги споживача-замовника (табл. 1):

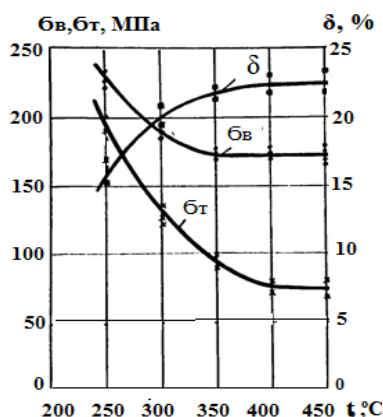
- для сплаву АД1 360 °С,
- для сплаву АМц 330 °С,
- для сплаву АМг3 350 °С.



а



б



в

Рис. 1. Залежність механічних властивостей сплавів АД1 (а), АМц (б) АМг3(в) від температури нагріву під час відпалу

Таблиця 1 – Механічні властивості сплавів, відпалених за оптимальної температури

Сплав	Після відпалу		
	Бв, МПа	Бт, МПа	δ, %
АЛ1	58	27	31
АМц	92	67	27
АМг3	173	90	23
Сплав	Вимоги замовника		
АД 1	60	25	25
АМц	90	65	22
АМг3	175	90	20

Збільшення часу видержки до 15 хвилин при рекомендованих температурах відпалу не суттєво вплинуло на показники механічних властивостей: міцність понизилася на 10-20 МПа, а пластичність підвищилася на ~2 %.

Аналіз мікроструктур показав, що у досліджуваному інтервалі видержок при рекомендованих температурах відпалу розмір зерна α – фази змінюється в межах одного номеру. Структура усіх сплавів внаслідок відпалу повністю рекристалізована, дрібнозерниста, однорідна (рис. 2).

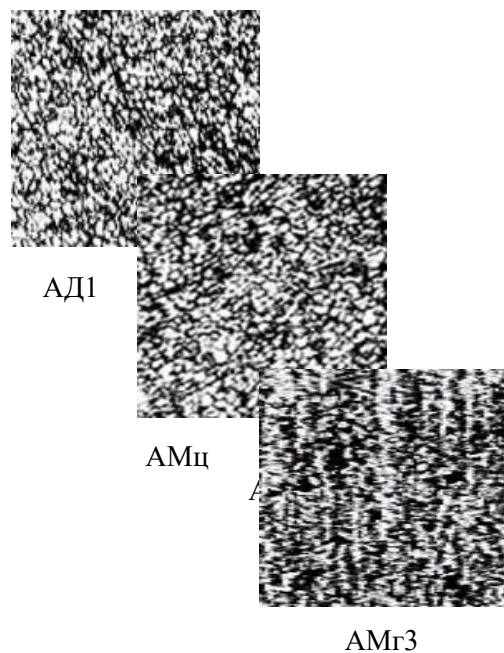


Рис. 2. Мікроструктура сталі 08 кп після швидкісного відпалу за умови 700 °С: а – витримування 5 хв; × 500

Для визначення впливу швидкості охолодження на властивості зразки алюмінієвих сплавів нагрівалися зі швидкістю 5 °С/с до 350 °С, витримувалися за цієї температури протягом 5 хв, а потім охолоджувалися на повітрі, у воді та з піччю. Здобуті результати свідчать, що швидкість охолодження практично не вплинула на значення мікротвердості сплавів, які зазнали повної рекристалізації в процесі подальшого нагрівання та витримання під час відпалу.

Проведені експерименти підтверджують доцільність швидкісного рекристалізаційного відпалу холоднокатаних смуг і стрічок з алюмінієвих сплавів завтовшки 0,8–1 мм. Для отримання гарантованого комплексу властивостей, що характеризують м'який стан сплавів та їх якісне штампування в холодному стані, швидкісний рекристалізацій-

ний відпал можна проводити з дотриманням енергетично економних параметрів (табл. 2).

Таблиця 2 – Оптимальні параметри швидкісного рекристалізаційного відпалу

Сплав	$V_H, \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$	$t_H, \text{ }^\circ\text{C}$	$\tau, \text{ хв}$	Охолодження
АД1	~5	360–370	5–10	повітря
АМц	«	320–330	«	«
АМг3	«	350–360	«	«

Необхідно зазначити, що відповідно до вимог поверхня листів має бути чистою: без тріщин, надривів, розшарування, бульбашок перепалу, плям шлакових включень.

Важливо, щоб параметр шорсткості поверхні не перевищував $Ra = 1,25$ мкм. Щоб переконатися у відповідності якості поверхні листа зазначеним вимогам, встановлена його шорсткість після безперервного швидкісного відпалу. Профілограма поверхні відпаленої смуги наведена на рис. 3 і свідчить, що висота рельєфу $Ra = 1,18$ мкм.

Отже, швидкісний відпал заготовок смуг із холоднокатаних листів алюмінієвих сплавів забезпечив однорідну структуру за довжиною та шириною смуги, більш високі характеристики міцності та пластичності порівняно з відпалом у садових ковпакових печах. Крім того, спостерігається значно краща якість поверхні, адже відсутній нагар і механічні пошкодження від транспортування, оскільки воно здійснюється на повітряній подушці.



Рис. 3. Шорсткість поверхні смуги після швидкісного рекристалізаційного відпалу

Для отримання відпалених заготовок із підвищеною міцністю на замовлення споживача було використане холодне пластичне деформування обтиском. Механічні властивості після різного ступеня деформування зображені на рис. 4, з якого видно, що властивості, які відповідають вимогам замовника, забезпечуються обтискуванням від 10 до

15 %. Для набуття більш високих показників властивостей на замовлення метал необхідно нагартувати деформуванням на 20–30 %. Водночас важливо мати на увазі, що різниця між границями міцності та плинності за умови значних ступенів деформації спричиняє погане штампування, згинання та зниження інших технологічних характеристик металу. Сплав АД1 у м'якому стані має достатньо високий відсоток подовження, тому його використовують для виробництва напівфабрикатів, заготовок і безлічі готових виробів способом глибокого та складного витягування (труби, резервуари, цистерни, посуд, холоднотягнуті профілі тощо). Для оцінювання цієї важливої технологічної властивості відпаленого за розробленим режимом сплаву постало питання визначити здатність до витягування за методом Еріксена.

Відповідно до інформації з літературних джерел, для відпаленого листа зі сплаву АД1 завтовшки 1 мм, що призначений для глибокого витягування, глибина лунки має дорівнювати 9,9 мм.

Результати випробувань на видавлювання листів у різному стані та різної товщини наведені на рис. 5. З рис. видно, що для листа завтовшки 1 мм глибина видавленої лунки дорівнює 11,15 мм (крива 1). Це свідчить про можливість якісного холодного штампування листа з глибоким і складним витягуванням.

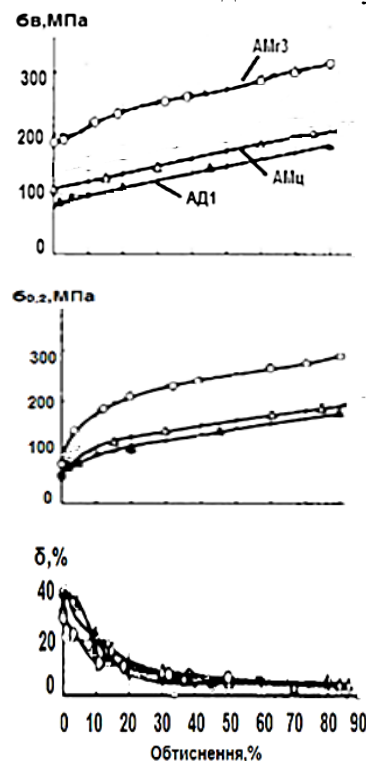


Рис. 4. Механічні властивості алюмінієвих сплавів залежно від ступеня холодного деформування обтисненням

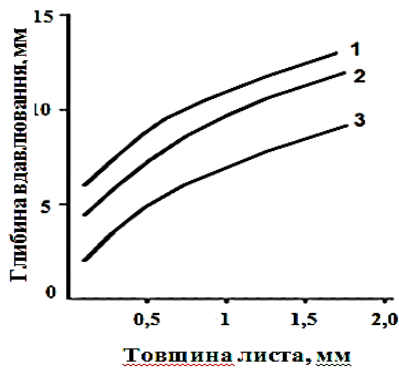


Рис. 5. Випробування смуги зі сплаву АД1 в різному стані (за Еріксоном): 1 – відпалений; 2 – напівнагартований (15 %); 3 – нагартований (40 %)

Для напівнагартованого холодним прокатуванням листа на 15 % глибина лунки 9,8 мм (крива 2), що майже відповідає відпаленому стану металу й гарантує можливість глибокого витягування під час виготовлення із заготовок методами холодного оброблення тиском. У листа, обтиснутого на 40 %, глибина лунки витягування дорівнює 6,2 мм (крива 3), і на її поверхні з'являється округла тріщина, бо нагартований метал є крупнозернистим, тож і більш крихким і до значної та складної холодної деформації не придатний. Використання алюмінієвих сплавів, що мають досить високі показники міцності, дає змогу в деяких ситуаціях замінити напівфабрикати з дорогих легованих сплавів більш дешевим прокатом.

Висновки

1. Експериментально доведено, що після швидкісного рекристалізаційного відпалу досліджені сплави АД1, АМц, АМг3 набувають однорідної, повністю рекристалізованої, дрібнозернистої структури.

2. Розроблені найменш енерговитратні режими безперервного швидкісного відпалу заготовок із тонколистового прокату (0,8–1 мм) досліджених алюмінієвих сплавів для отримання підвищених показників пластичності (за умови збереження міцності) та покращення холодного оброблення тиском під час виготовлення виробів складної конфігурації.

3. Для відпаленого сплаву АД1, який у найбільших об'ємах використовується для напівфабрикатів широкої номенклатури виробів, визначений інтервал ступеня (від 10 до 15 %) подальшого механічного нагартування

для отримання напівнагартованого стану сплаву, що дає змогу виготовляти вироби методами холодного деформування з глибоким, а іноді й складним витягуванням. У цьому разі поверхня має високу якість.

4. Швидкісний рекристалізаційний відпал на експериментальному обладнанні з контактним нагрівом підвищує технологічну пластичність заготовок із вже готового листа, покращує штампування виробів, що сприятиме зменшенню браку, економії металу та зниженню витрат під час виготовлення тонколистової продукції холодною деформацією з глибоким і складним витягуванням.

Література

1. Металургія кольорових металів: підручник / В.І. Пожувєта та ін.; за ред. І.Ф. Червоного. Запоріжжя: ЗГИА, 2008. Ч. I. 351 с.
2. Алюмінієва промисловість України: від занепаду до потенційного зростання / А.Г. Пригунова та ін. *Met. lit'e Ukr.* 2022. Vol. 30. № 3 (330). Р. 8–20.
3. Кольорові метали і сплави: навч. посіб. / В.Л. Грешта та ін. Запоріжжя: ЗНТУ, 2015. 336 с.
4. Застосування алюмінію і його сплавів: веб-сайт. URL: http://tpk-ugmet.at.ua/dir/metaloprokat/zastosuvannja_aljuminiju_i_jogo_splaviv/1-1-0-7 (дата звернення: 02.11.2023).
5. Технологія і проектне рішення термічних цехів і дільниць: навч. посіб. / В.І. Сігова та ін. Суми: СумДУ, 2010. 318 с.
6. The effect of annealing temperature on the recrystallization and mechanical properties of severe plastic deformed commercial pure aluminium during ultra-fast annealing / Yanjun Zhao et al. *Materials Research Express*. 2021. Vol. 8. № 4. Р. 1–9. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2053-1591/abf3e3/pdf> (last accessed: 02.11.2023)
7. Дошечкіна І.В. Зменшення браку листових заготовок зі сталі 08, призначених для холодного штампування виробів. *Вісник ХНАДУ*. 2021. Вип. 94. С. 47–54.
8. Дошечкіна І.В. Підвищення технологічної пластичності при збереженні міцності холоднокатаної тонколистової низьковуглецевої сталі. *Вісник ХНАДУ*. 2020. Вип. 91. С. 165–171.

References

1. Metalurhiya kol'orovykh metaliv: pidruchnyk (2008) / V.I. Pozhuyevta ta in.; za red. I.F. Chervonoho. Zaporizhzhya, ch. I, 351 s.
2. Alyuminiyeva promyslovisht' Ukrayiny: vid zanepadu do potentsiynoho zrostannya (2022) / O.H. Pryhunova ta in. *Met. lit'e Ukr.*, vol. 30, no. 3 (330), p. 8–20.

3. Kol'orovi metaly i splavy: navch. posib. (2015) / V.L. Hreshcha ta in. Zaporizhzhya. 336 s.
4. Zastosuvannya alyuminiyu i yoho splaviv: veb-sayt. URL: http://tpk-ugmet.at.ua/dir/metaloprokat/zastosuvannya_aljuminiju_i_jogo_splaviv/1-1-0-7 (data zvernennya: 02.11.2023).
5. Tekhnolohiya i proektne rishennya termichnykh tsekhiv i dil'nyts': navch. posib. (2010) / V.I. Sihova ta in. Sumy, 318 s.
6. The effect of annealing temperature on the recrystallization and mechanical properties of severe plastic deformed commercial pure aluminium during ultra-fast annealing / Yanjun Zhao et al. *Materials Research Express*. 2021. Vol. 8. № 4. P. 1–9.
URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2053-1591/abf3e3/pdf> (last accessed: 02.11.2023)
7. Doshchekina, I.V. (2021). Zmenschennya braku lystovoykh zahotovok zi stali 08yu pryznachenykh dlya kholodnoho shtampuvannya vyrobiv. *Visnyk KHNADU*, vyp. 94, s. 47–54.
8. Doshchekina, I.V. (2020). Pidvyshchennya tekhnolohichnoyi plastychnosti pry zberezheni mitsnosti kholodnokatanoyi tonkolystovoyi nyz'kovuhletsevoyi stali. *Visnyk KHNADU*, vyp. 91, s. 165–171.

Дощечкіна Ірина Василівна, к.т.н., проф. кафедри технології металів та матеріалознавства, ХНАДУ, тел. +38 095-162-82-50, divkhadi@ukr.net.

Improving the quality of cold-rolled deformable aluminum alloy billets

Abstract. A mode of high-speed recrystallization annealing has been developed to increase technological plasticity while maintaining the strength of sheet cold-rolled blanks made of deformable aluminum alloys that are not strengthened by heat treatment.

Problem. Cold deformation of cold-rolled plates is achieved by recrystallization annealing in hooded furnaces. However, such annealing often does not provide the technological plasticity for defect-free stamping of products and, as a result, has significant

rejects. Hooded furnaces are not suitable for improving the deformation of individual billets. In addition, for products with complex configurations that operate in harsh environments, the requirements for rolled aluminum are increased, which is also not possible to realize in open hearth furnaces. These problems can be solved by high-speed continuous parting heat treatment. **Goal.** The aim is development of a high-speed recrystallization annealing regime for increasing technological plasticity while maintaining the strength of cold-rolled sheet billets from deformable aluminum alloys. **Methodology.** The object of the study was thin-sheet (1 mm) billets from cold-rolled aluminum alloys AD1, AMts, AMg3. Strip blanks were subjected to high-speed continuous recrystallization annealing using contact heating. The metal was heated at a rate of 5 °C/c to temperatures from 250 to 400 °C with an interval of 50 °C with a holding time of 5 - 15 min at the heating temperature and cooling in air. The quality of the annealing was judged by the nature of the obtained structure and indicators of mechanical properties. The ability to extract metal in different states was evaluated by the Eriksen method. **Result.** The least energy-consuming modes of continuous high-speed annealing of workpieces from the studied alloys were developed to obtain increased plasticity indicators (while maintaining strength) and improve cold pressure processing in the manufacture of products of complex configuration. **Practical value.** High-speed recrystallization annealing provides reduction of defects, saving of metal, improvement of productivity in the production of thin-sheet items by the method of cold deformation with deep and complex drawing.

Key words: deformable aluminum alloys, thin sheet, rapid heating, recrystallization annealing, tempering, structure, mechanical properties, sheet stamping, deep drawing.

Doshchekina I. Ph.D., Associate professor of Metal Technology and Material Science Department, KHNADU tel. +38 095-162-22-50, e-mail: divkhadi@ukr.net.