

Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Област: Производно машинство

Предмет: Савремени поступци пластичног обликовања

Број индекса: 419/2018

Радован Р. Бачанин

Експонент деформационог ојачавања као параметар
деформабилности савремених лимова

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Србислав Александровић, ред. проф. – ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ

Факултет инжењерских наука

Катедра за производно машинство

Мастер рад

Предмет: **Савремени поступци пластичног обликовања**

Назив теме:

**ЕКСПОНЕНТ ДЕФОРМАЦИОНОГ ОЈЧАВАЊА КАО ПАРАМЕТАР
ДЕФОРМАБИЛНОСТИ САВРЕМЕНИХ ЛИМОВА**

1. Увод
2. Деформабилност танких лимова
3. Деформационо ојачање
4. Експериментална испитивања
5. Закључак
6. Литература

Кандидат:

Радован Бачанин, бр. инд.: 419/2018

Ментор:

Др Србислав Александровић ред. проф.

У Крагујевцу, октобар 2020. године.

Опис теме мастер рада:

У уводном делу рада кандидат треба да изложи општи поглед на деформабилност савремених танких лимова (параметри деформабилности, анизотропија, гранична деформабилност), затим да објасни ефекат деформационог ојачања са нагласком на криве течења и нарочито, на експонент деформационог ојачања. Одабране методе за одређивање експонента деформационог ојачања кандидат треба да реализује у експерименталним испитивањима савремених лимова од различитих материјала. Добијене резултате је потребно анализирати и дати процену њихове вредности и употребљивости. У закључку треба дати завршну процену о значају експонента деформационог ојачања, примењеним методама и добијеним резултатима.

Препоручена литература:

- [1] Деведић Б.: Основи теорије пластичног деформисања метала, Машински факултет у Крагујевцу, 1975.
- [2] Деведић Б.: Пластичност и обрада метала деформисањем, Научна књига Београд, 1992.
- [3] Александровић С.: Савремени поступци пластичног обликовања, скрипта, Moodle портал Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2018.

Ментор:

Крагујевац, октобар 2020. год

Др Србислав Александровић, ред. проф.

Резиме:

Овај мастер рад се састоји из два дела. У првом делу изложено је разматрање важних аспеката деформабилности танких лимова: граничне деформабилности, анизотропије и основних параметара деформабилности. У другом, централном делу рада, дато је разматрање феномена деформационог ојачавања метала. Нарочита пажња посвећена је експоненту деформационог ојачавања ("n" фактору). Приказано је експериментално испитивање осам танких лимова од различитих материјала. На свим материјалима тестиране су три методе за одређивање "n" фактора. На основу анализе добијених резултата одабрана је најпогоднија метода.

Кључне речи: деформабилност танких лимова, деформационо ојачавање, експонент деформационог ојачавања ("n" фактор)

Abstract:

This master thesis is consist of two parts. In the first part, presented is the consideration of important aspects of thin sheet metals formability: limit formability, anisotropy and basic formability parameters. In the second, central part of this work, given is analysis of metal strain hardening phenomena. Special attention was paid to strain hardening exponent ("n" factor). Experimental investigation of eight different thin sheets is shown. On all these materials tested are three methods for "n" factor determination. Based on obtained results analysis, chosen was most appropriate method.

Keywords: thin sheet metals formability, strain hardening, strain hardening exponent ("n" factor)

Предговор

У мастер раду, који је пред Вама, покушао сам да објасним главне аспекте деформабилности, као и феномен деформационог ојачавања метала, а уз све изложио сам експериментални део и резултате на основу урађених анализа.

Свом ментору, проф. др Србиславу Александрићу се захваљујем на предложеној веома интересној теми овог мастер рада. Посебно му се захваљујем на великој сарадњи, помоћи, саветима и разумевању, које ми је пружио током израде овог рада, као и током мастер студија.

Захваљујем се свим својим пријатељима и колегама, који су ми на било који начин пружили помоћ и подршку током мог досадашњег студирања. Посебно се захваљујем својој породици на великој подршци разумевању током школовања.

Крагујевац, октобар 2020. године

Радован Бачанин

САДРЖАЈ

1. УВОД	1
2. ДЕФОРМАБИЛНОСТ ТАНКИХ ЛИМОВА	3
2.1 ОСНОВНИ ПАРАМЕТРИ ДЕФОРМАБИЛНОСТИ.....	3
2.2 АНИЗОТРОПИЈА КОД ЛИМОВА	4
2.3 ГРАНИЧНА ДЕФОРМАБИЛНОСТ.....	4
2.3.1 ГРАНИЧНА ДЕФОРМАБИЛНОСТ У УСЛОВИМА МОНОТОНОГ (ПРОПОРЦИОНАЛНОГ) ДЕФОРМИСАЊА.....	5
2.3.1 ГРАНИЧНА ДЕФОРМАБИЛНОСТ У УСЛОВИМА НЕМОНОТОНОГ ДЕФОРМИСАЊА	9
3. ДЕФОРМАЦИОНО ОЈАЧАЊЕ.....	14
3.1 ЕФЕКАТ ДЕФОРМАЦИОНОГ ОЈАЧАЊА.....	14
3.2 КРИВЕ ОЈАЧАЊА	15
3.2.1 ОДРЕЂИВАЊЕ КРИВИХ ОЈАЧАЊА ЗАТЕЗАЊЕМ	16
3.2.1 АНАЛИТИЧКЕ АПРОКСИМАЦИЈЕ КРИВИХ ОЈАЧАЊА	18
3.3 УТИЦАЈ БРЗИНЕ ДЕФОРМАЦИЈЕ И ТЕМПЕРАТУРЕ НА ОЈАЧАЊЕ	20
3.4 ЕКСПОНЕНТ ДЕФОРМАЦИОНОГ ОЈАЧАЊА - "n" ФАКТОР	21
3.4.1 МЕТОДЕ ОДРЕЂИВАЊА "n" ФАКТОРА	21
3.3.4.1 ДРУГИ ПОСТУПЦИ ОДРЕЂИВАЊА "n" ФАКТОРА	23
3.3.4.2 МЕХАНИЗАМ УТИЦАЈА "n" ФАКТОРА НА ДЕФОРМАБИЛНОСТ.....	25
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА.....	27
4.1 ПЛАН ЕКСПЕРИМЕНТА И МЕРНА ОПРЕМА	27
4.2 ПРИМЕНА КЛАСИЧНЕ МЕТОДЕ ЗАТЕЗАЊА – РЕЗУЛТАТИ.....	31
4.3 ПРИМЕНА МЕТОДЕ ЗАТЕЗАЊА ДВОСТЕПЕНЕ ЕПРУВЕТЕ – РЕЗУЛТАТИ	55
5. ЗАКЉУЧАК	66
6. ЛИТЕРАТУРА	67

1. УВОД

У индустрији и технологији пластичног обликовања лима у савременом свету, током задњих пар деценија дошло је до значајнијих промена. Подигнут је ниво аутоматизације у фабрикама делова од лима. Традиционална слика човека поред пресе, који својим знањем и искуством решава текуће проблеме скоро да је потпуно нестала. Постале су неизводљиве мање корекције процеса потребне због промена у врсти и квалитету материјала или варијације неких других утицајних фактора. Такав технолошки ниво утицао је да се сузе захтеване толеранције квалитета материјала и посвети пажња елементима процеса који до сада нису уопште или су мало третирани. Произвођачи лимова успевају да редукују промене у вредностима механичких карактеристика и број површинских дефеката.

Технологија пластичног обликовања метала обухвата технолошке процесе код којих се под дејством довољно великог спољашњег оптерећења остварује пластична деформација, односно трајно мења облик полазног материјала. У току овог процеса долази до значајних промена у материјалу. Мењају се његова механичка, технолошка и друга својства. Овом технологијом обраде се од полазних материјала (који су најчешће полуфабрикати у облику: лимова, плоча, цеви, пуних профила итд.) добијају готови делови различитих облика и димензија.

Обликовање метала се врши у хладном или у топлом стању. При обради у хладном стању постижу се најповољнија механичка својства, већа прецизност и чистије површине, док деформисање у топлом стању захтева мању силу, односно рад, а материјал има повећану деформабилност.

У процесима пластичног обликовања не смеју се прекорачити вредности граничних износа напона и деформација, јер се у противном разара структура материјала или појављују други неприхватљиви дефекти. Не смеју се прекорачити ни интензитети контактних напона јер може доћи до преоптерећења комада и алата.

Деформабилност је термин који се често користи у оквиру технологије пластичног обликовања и представља најопштију способност материјала да се деформише еластично или пластично. Процеси пластичног обликовања метала су изузетно сложене природе. Циљ истраживача и инжењера практичара је што боље разумевање тих процеса, улазак у суштину њихових законитости, односно, овладавање знањима која би омогућила потпуну контролу оваквих процеса. То би резултирало сигурним постизањем свих пројектованих карактеристика жељеног производа.

У научном и инжењерском систему изучавања пластичног обликовања метала једно од значајних места заузима гранична деформабилност. У области изучавања деформабилности то је, свакако, централно место. Гранична деформабилност означава способност максимално могуће деформације према одговарајућим критеријумима. Најчешће је то разарање или локализовано деформисање. Најзначајнији утицаји на деформабилност су: материјал (хемијски састав и структура), температура обраде, брзина деформације и напонско стање.

Директно везана за деформабилност је појава деформационог ојачавања. То је специфичан феномен, ефекат углавном својствен металним материјалима, који се манифестује као изразити пораст чврстоће, односно напонских карактеристика (уз истовремено опадање пластичности), током процеса пластичног обликовања. Због тога су деформабилност и деформационо ојачање супротни појмови. Повољна деформабилност неког материјала значи слабије изражена својства деформационог ојачавања и обрнуто: материјал са изразитим особинама ојачавања има лошију деформабилност. Ако се

претходно има у виду постаје јасно да се детаљним испитивањем ефекта деформационог ојачавања заправо посредно сагледава веома значајан сегмент у укупној процени деформабилности материјала. У овом раду посебна пажња посвећена је ефекту деформационог ојачања танких лимова који представљају изузетно значајне савремене материјале са великом применом у готово свим индустријама.

Треба поменути још једну појаву у процесима пластичног обликовања. Када је деформационо стање у неком тренутку процеса исто у свим тачкама тела, онда се деформисање сматра хомогеним. Претпоставка о хомогеном деформисању омогућује да се на основу промена димензија целог тела изведе општи закључак о његовој деформацији. Ако су деформације на појединим критичним местима веће него што показују промене укупних спољашњих димензија комада, процес деформисања је нехомоген. Главни узроци настајања нехомогеног деформисања су утицаји: контактнoг трења, облика радног комада (облик алата присиљава поједине делове материјала да пређу различите путеве), као и својства микро-структурне и макро-структурне грађе металних материјала.

Примена технологије пластичног обликовања је у порасту. Према релевантним подацима, у савременој индустрији више од 80% свих металних материјала пре или касније биће обрађено неким од технолошких процеса пластичног обликовања.

Како је претходно поменуто, у овом раду биће речи о деформабилности металних материјала, а нарочито о ефекту деформационог ојачања танких лимова и начинима како се он конкретно изражава. Планирана су и успешно изведена експериментална испитивања серије узорака од различитих материјала како би се показала разноликост карактеристика деформационог ојачања, с једне, и верификовала методика и начини одређивања карактеристика деформационог ојачања, с друге стране.

2. ДЕФОРМАБИЛНОСТ ТАНКИХ ЛИМОВА

У оквиру ТПО често се користе термини: деформабилност, пластичност и обрадивост. Сва три термина упућују на способност материјала да се трајно деформише, иако могу да се уоче значајне разлике како у језичком смислу тако и у стеченим навикама у примени. Прецизно гледано, деформабилност представља општу способност материјала да се обликује до одговарајуће вредности деформације. Иако материјал може да се деформише и у еластичној области, најчешће се подразумева пластично обликовање. Ако се предходно прихвати, онда пластичност постаје синоним за деформабилност. Код деформабилности увек се дефинише критеријум, односно износ неког од показатеља деформације који ближе дефинише област деформисања. Најбољи пример је дефинисање граничне деформабилности, као способност материјала да се пластично деформише до одређених максималних, односно граничних вредности деформација. Критеријум за граничне деформације је најчешће појава разарања, локализованог деформисања или неког другог дефекта. Обрадивост се обично везује за конкретне процесе обликовања (на пр. дубоко извлачење, ковање итд). Ако постоји потреба да се тај термин користи уопштено, исправније је употребљавати термин деформабилност као најопштији.

Најзначајнији утицаји на деформабилност су: материјал (хемијски састав и структура), температура обраде, брзина деформације и напонско стање.

2.1 Основни параметри деформабилности

Параметри деформабилности су карактеристике које имају константну вредност за дати материјал и одређују се путем експеримента брзо и лако. Представљају основне величине у испитивању свих аспеката деформабилности. На пример, једноосним затезањем, при хомогеном деформисању, добијамо показатеље:

- граница течења (R_p , MP_a),
- затезна чврстоћа (R_m , MP_a),
- процентуално издужење при разарању (A , %)
- контракција попречног пресека (Z , %).
- Овим тестом, одређују се још и:
- криве ојачања (K),
- експонент деформационог ојачања (" n ") и
- својства анизотропије (раванска и нормална).

Погодно је да граница течења буде нижа, уз однос $R_p/R_m=0,55\div 0,6$. Овај однос илуструје ојачање и има висок степен корелације са експонентом деформационог ојачања (" n " фактором).

Област примене добијених показатеља је ограничена напонско-деформационом шемом конкретног теста и применљивост је добра за процесе обликовања сродне том тесту. На пр., јасно је да се параметри добијени затезањем не могу директно применити на сабијање или ковање.

Опис деформационог ојачања, како је већ поменуто, најбољи је преко кривих ојачања (зависност еквивалентног напона-деформационог отпора, од еквивалентне пластичне деформације). Посебно је значајан експонент " n " који произлази из аналитичке апроксимације криве ојачања ($K = C \cdot \varphi^n$). Иако ова апроксимација није погодна за мање

деформације, у области већих деформација врло успешно апроксимира стварну криву течења за лимове (изнад око 5%). Како експонент "n" директно дефинише нагиб криве ојачања (интензитет ојачавања) и он узет као један од битнијих показатеља обрадивости.

$n = \varphi_M = \frac{l_M}{l_0}$, где су l_0 и l_M почетна и максимална дужина епрувете.

О ојачању и "n" фактору детаљније разматрање дато је у глави 3.

2.2 Анизотропија код лимова

Анизотропија означава варијацију карактеристика материјала зависно од правца по посматраној запремини. Својства анизотропије код лимова обично се разврставају у две групе, с обзиром на:

- анизотропију у равни лима (планарну, раванску) и
- нормалну анизотропију (управну на раван лима, у правцу дебљине).

У случају раванске анизотропије лима, правци се дефинишу у равни лима а не по запремини. Референтни правац је правац ваљања. Као последица претходног металуршког поступка, зрна су у мањој или већој мери усмерена у правцу ваљања, а видљиви су и трагови клизања (при оптичким повећањима до 100 пута). У односу на тај правац поларно се дефинишу други карактеристични правци. Обично су то правци под углом од 45° и 90°. После одређивања вредности одговарајућих карактеристика за сва три правца, врши се осредњавање према изразу:

$$\bar{Y} = \frac{1}{4}(Y_0 + 2Y_{45} + Y_{90}) \quad (1)$$

Уколико се не врши осредњавање, него се користи карактеристика одређена само у једном правцу, потребно је нагласити тај правац.

Нормална анизотропија односи се на правац нормалан (управан у геометријском смислу) на раван лима. Дефинише се преко коефицијента нормалне анизотропије, r фактора:

$r = \frac{\varphi_b}{\varphi_s}$, где је φ_s деформација дебљине, а φ_b деформација ширине епрувете.

Одређује се једноосним затезањем у области хомогеног деформисања. Код изотропног материјала, ове деформације су једнаке, па је $r=1$. Ако је $r>1$ деформација дебљине лима је мања од деформације у равни. То значи да лим показује склоност ка повећању деформација у равни и отпорност према стањењу. Такви лимови имају мању вероватноћу настанка локализованог деформисања и имају знатно бољу деформабилност у том смислу.

Бројна испитивања показују висок степен корелације између граничног степена дубоког извачења и "r" фактора. Већи "r" фактор указује да материјал издржава веће оптерећење независно од интензитета ојачања. Из овога се може закључити да је пожељна што већа вредност "r" фактора. Због својих особина "r" фактор је одличан показатељ деформабилности лимова при затезању.

2.3 Гранична деформабилност

Гранична деформабилност се може дефинисати као способност материјала за достизање максимално могућих деформација при одговарајућим условима обликовања. Критеријум за дефинисање граничне деформабилности може да буде разарање или

локализација (појава нестабилног деформисања). Као критеријум деформабилности се може узети и појава разних дефеката као што су набори, оштећења површине, девијације облика и томе сл., када се сматра да је процес неуспешан. Гранична деформабилност код лимова ограничава област успешне обраде у деформационом простору у коме било која тачка означава деформационо стање остварено без дефеката. Са друге стране границе те области се налази зона неуспешне обраде (са локализацијом или разарањем). У којој од ових области ће се наћи деформационо стање неке тачке зависи од низа фактора. На већину њих је могуће утицати. Некима је могуће потпуно управљати и усмеравати процес обраде ка поузданом и сигурном завршетку.

2.3.1 Гранична деформабилност у условима монотоног (пропорционалног) деформисања

Пропорционално напрезање остварује се онда када спољашње силе, које оптерећују посматрани елемент, од почетка деформисања расту пропорционално једном општем, константном параметру.

Монотонно деформисање постоји кад су испуњена два услова:

- главне осе брзина деформација треба да се поклапају са истим влакнима материјала,
- однос између главних компонената брзине деформације мора се држати сталним.

За овај тип напрезања и раванско напонско стање важи:

$$m = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \text{const.}; \quad t = \frac{\varphi_1}{\varphi_2} = \text{const.} \quad (2 \text{ и } 3)$$

Веза између напонског (m) и деформационог (t) параметра, за изотропан материјал:

$$m = \frac{2t+1}{2+t} = \frac{2\varphi_2+\varphi_1}{2\varphi_1+\varphi_2}; \quad t = \frac{2m-1}{2-m} \quad (4 \text{ и } 5)$$

За анизотропни материјал:

$$m = \frac{\left(\frac{1}{r_0}+1\right)t+1}{\frac{1}{r_{90}}+t+1} = \frac{\left(\frac{1}{r_0}+1\right)\varphi_2+\varphi_1}{\left(\frac{1}{r_{90}}+1\right)\varphi_1+\varphi_2}; \quad t = \frac{\left(\frac{1}{r_0}+1\right)m-1}{\frac{1}{r_0}-m+1} \quad (6 \text{ и } 7)$$

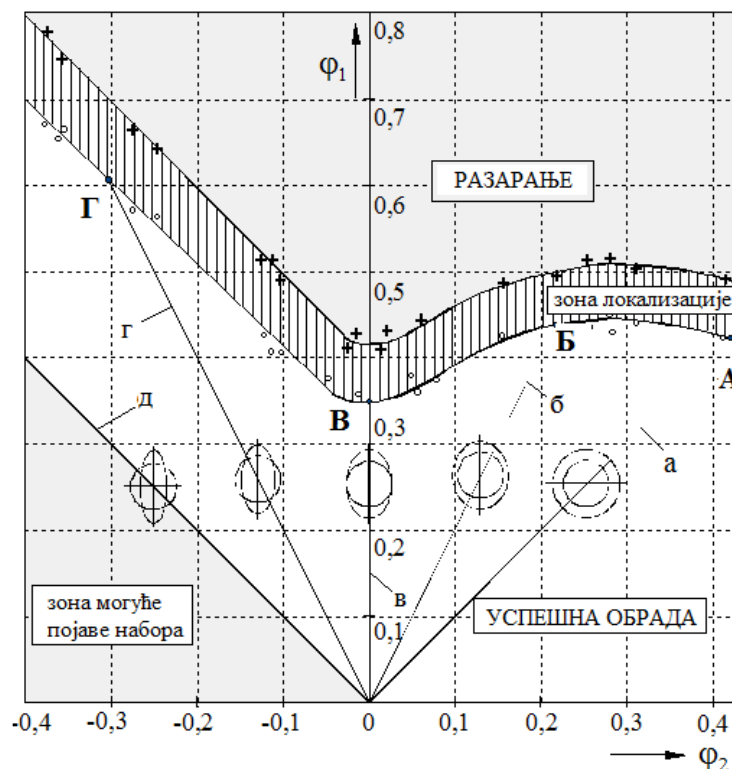
Како је напоменуто, граничну деформабилност је најбоље посматрати и изражавати у деформационом простору главних деформација. Због непроменљивости запремине у области пластичности, тродимензиони деформациони простор се може редуковати на дводимензиони и у њему дефинисати дијаграм граничне деформабилности (ДГД)

Основу за одређивање ДГД чини графометријска метода мерних мрежа и деформациона анализа која следи иза ње.

ДГД има неколико поља. Зона локализације простире се од линије почетка локализованог деформисања до линије разарања, изнад које је област разарања. Испод доње линије је област успешне обраде. Експерименталне тачке које дефинишу граничне криве су, мање или више, расуте. Свака права повучена из координатног почетка до граничних кривих представља једну напонско-деформациону шему монотоног деформисања, односно једну путању. Означено је 5 карактеристичних путања које су објашњене на слици 1. На путањама су симболично означени кружићи мерне мреже пре и после деформисања. Запажа се да је најнеповољније раванско деформационо стање ($\varphi_1 = -\varphi_3$ при $\varphi_2 = 0$) при коме се лим најбрже тањи и разара. Уколико је φ_2 негативније (нарочито ако интензитет

притисног напона σ_2 расте) гранична деформација $s\varphi_1$ нагло расте, што је у складу са постулатом теорије пластичности о порасту деформабилности у условима већих притискујућих напона.

Код једноосног затезања нема притискујућих напона, а вредност граничне деформације φ_1 је велика. То донекле важи и за случајеве двоосног затезања (област десно од ординате). Објашњење лежи у геометријским особинама лима (једна димензија је скоро занемарљиво мала у односу на друге две).



Слика 1. Дијаграм граничне деформабилности (ДГД) за лимове

За путање деформисања (а до д) на ДГД важи:

а: $m = 1$; $t_{iz} = 1^*$ - равномерно двоосно затезање,

б: $0,5 < m < 1$; $0 < t_{iz} < 1$ - неравномерно двоосно затезање,

в: $t = 1$; $m_{iz} = 0,5^*$ - раванско деформационо стање (савијање, затезање),

г: $m = 0$; $t_{iz} = 0,5$ - равномерно једноосно затезање,

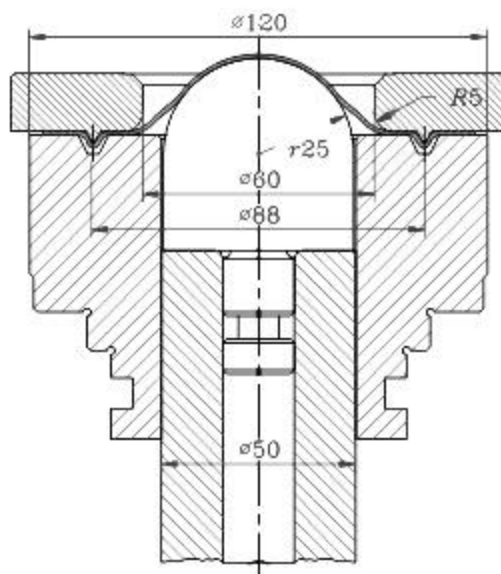
д: $m < 0$; < 1 ; $t_{iz} < -0,5$ - раванско напонско стање (обод при чистом дубоком извлачењу)

*-важи за изотропан материјал

Крајњи леви део дијаграма карактерише односе који постоје код обода делова који се добијају дубоким извлачењем. Покушај дефинисања поља набора није дао задовољавајуће резултате, зато што на појаву набора суштински утиче геометрија комада коју дијаграм не може да узме у обзир. Десни део карактеристичан је за разне типове двоосног затезања (развлачења), нарочито у условима фиксiranог обода комада.

Дијаграм граничне деформабилности се одређује експериментално. Један од често коришћених поступака је развлачење полусферичним извлакачем серије епрувета

различите ширине (слика 2). За приказан алат епрувете имају дужину 120 mm. Ширина је у распону 30-120 mm са порастом од по 10 mm.



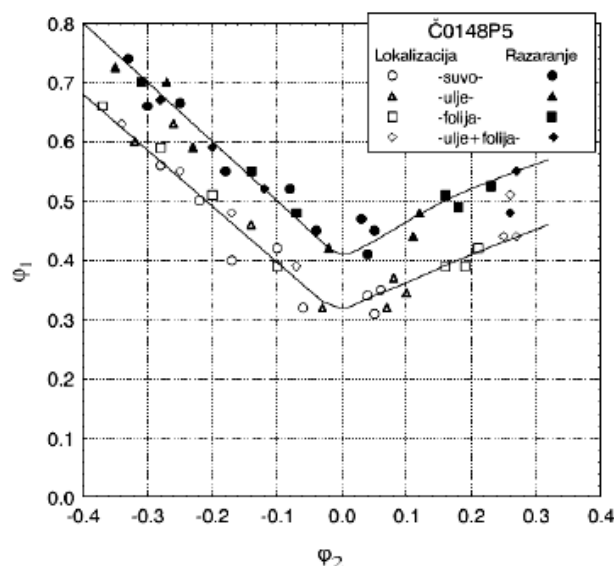
Слика 2. Шема алата за одређивање дијаграма граничне деформабилности

Најзначајнији утицај на положај граничних кривих имају следећи фактори:

- Материјал (врста и дебљина),
- Експериментална методологија одређивања,
- Крупноћа мерне мреже и
- Историја деформисања.

Утицаји под 2 и 3 су обично искључени јер се за једно истраживање најчешће користи један тип мерне мреже и један поступак добијања дијаграма. Међутим, код упоређивања резултата различитих истраживања прецизно треба водити рачуна о методологији и критеријумима одређивања, условима испитивања, мерној мрежи итд.

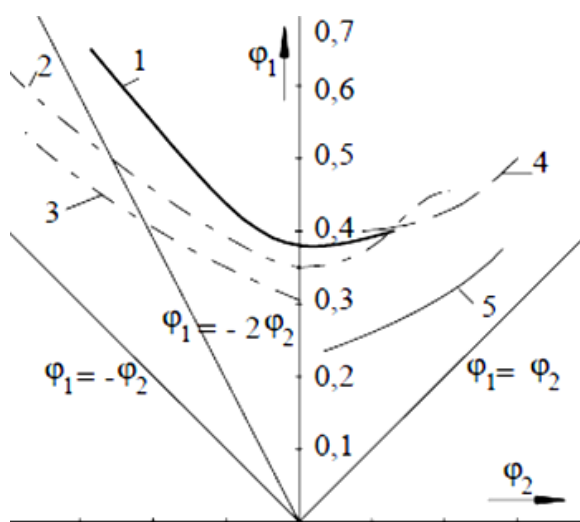
Утицај трења на положај граничних кривих ДГД дат је на слици 3. Експерименталне тачке су добијене варирањем контактних услова, од екстремних (потпуно суве површине, потпуно подмазивање (квази-хидродинамичко) применом фолије и уља за дубоко извлачење) до мешовитог подмазивања (уље) и коришћења фолије.



Слика 3. ДГД добијен при различитим условима трења

Јасно је видљиво да услови трења не утичу на значајније померање граничних кривих. Илустративан је положај тачака у десном делу ДГД. Што је трење веће, теже је течење метала у тангенцијалном правцу (мање φ_2 , све до $\varphi_2 = 0$ за раванско деформационо стање). Услови деформисања су лошији па је и φ_1 мање. Мањем трењу одговара равномерније деформисање. φ_2 је знатно веће, али и φ_1 расте, па се добија ефекат кретања тачака по граничној кривој. Померање граничних кривих у правцу ординатне осе захтевало би прираштај $\Delta\varphi_1$ при $\varphi_2 = const.$, што је могуће само у појасу локализације. Померање кривих у правцу апсцисне осе значило би да при константној већој главној деформацији ($\varphi_1 = const.$) постоји прираштај $\Delta\varphi_2$. Са великом сигурношћу се може рећи да променом само услова трења при монотоним деформисању такве ефекте није могуће добити. Физичко разумевање деформационих збивања налаже да променом услова трења није могуће мењати интензитете деформисања у појединим правцима одвојено.

Експериментални поступци за одређивања ДГД могу бити различити. На слици 4 дато је поређење резултата за 5 поступака. Видљиве су разлике између кривих као последица једино другачијег поступка одређивања.



Слика 4. Утицај врсте експерименталног поступка на положај ДГД

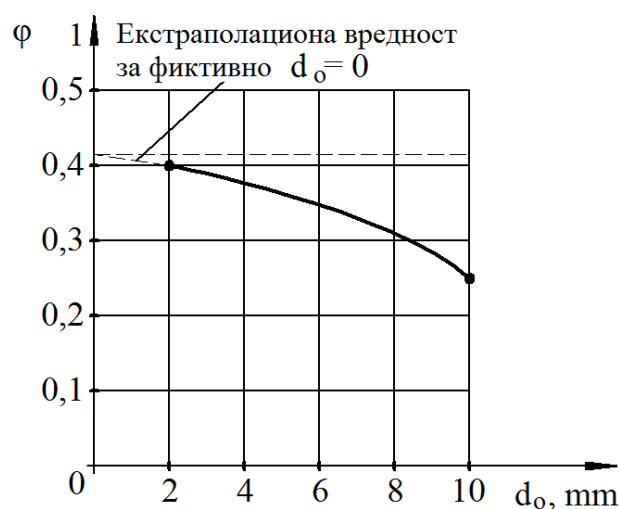
На слици 4 приказани су ДГД за следеће методе:

- 1- Полусферни чврст извлакач - траке лима са бочним усецима
- 2- Полусферни чврст извлакач - траке лима без бочних усека
- 3- Једноосно затезање
- 4- Извлачење извлакачима различитих облика
- 5- Извлачење флуидом

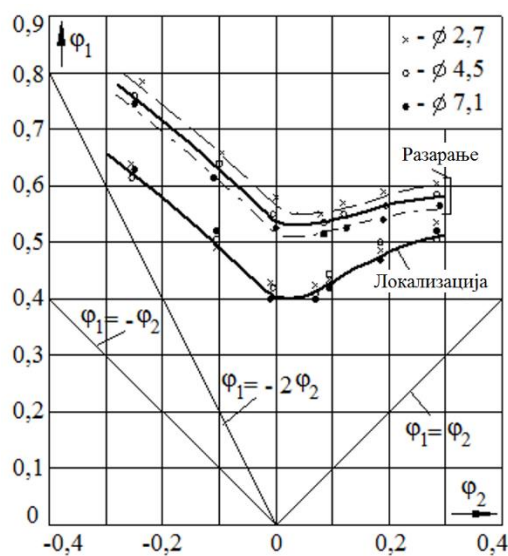
Дебљина лима $s = 1 \text{ mm}$

Мерна мрежа $d_0 = 4.5 \text{ mm}$

Иако се за величину мерне мреже чини да може значајно да утиче на положај кривих управо тај фактор има знатан утицај. И то је илустровано на сликама 5 и 6. Већи елементи мерне мреже значе нижи положај кривих ДГД.



Слика 5. Утицај крупноће мерне мреже на вредност деформације

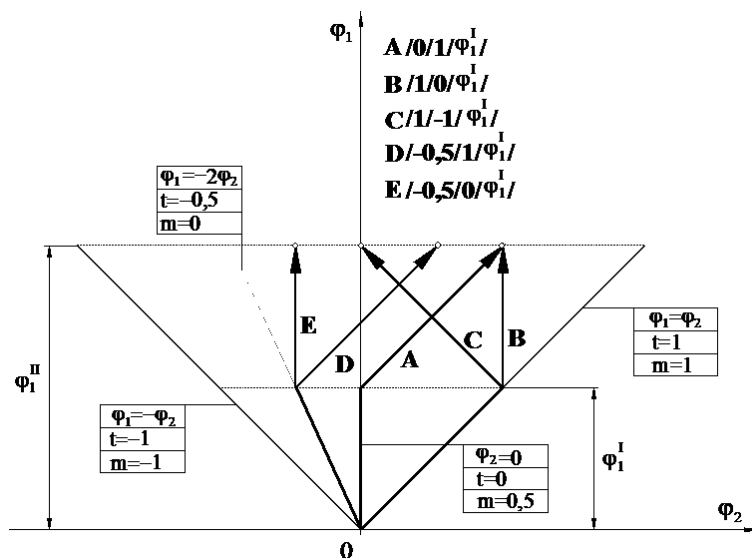


Слика 6. Утицај крупноће мерне мреже на положај ДГД

2.3.1 Гранична деформабилност у условима немонотоног деформисања

Аналитичко описивање и разумевање процеса деформисања релативно су једноставни за монотонно деформисање. Реални процеси се изводе у условима који најчешће одступају

од пропорционалног деформисања, што је нарочито изражено у вишеоперационим поступцима обликовања лима. Уместо термина немонотонно или непропорционално деформисање врло често се користи термин “променљива (сложена) историја деформисања”. Историја процеса пластичног деформисања се најсликовитије изражава преко тзв. путања или трајекторија деформисања које смо као праве већ видели на ДГД. То су линије које графички представљају начин промене односа главних деформација φ_1 и φ_2 , све до разарања. На слици 7 су приказане појединачно најчешће коришћене линеарне путање деформисања за двофазни процес.



Слика 7. Приказ најчешће реализованих путања при двофазном деформисању

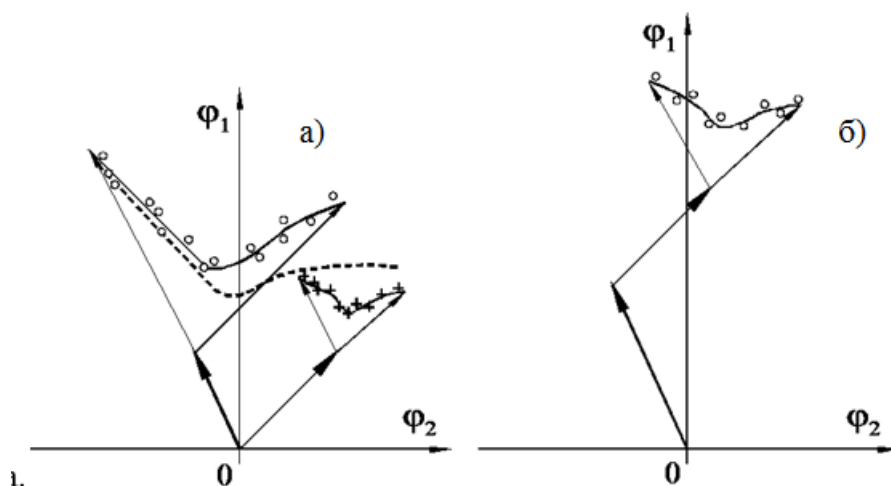
Аналитичко изражавање путања је најједноставније преко деформационог фактора t (поглавље 2.3.1), који је у директној вези са напонским коефицијентом m и који одређује правац путање. Свака сложена двофазна линеарна путања може се описати на следећи начин:

$$\varphi_2 = \begin{cases} t^I \cdot \varphi_1 & ; \varphi_1 \leq \varphi_1^I \\ t^{II} \cdot \varphi_1^{II} (\varphi_1 - \varphi_1^I) & ; \varphi_1 > \varphi_1^I \end{cases} \quad (8)$$

где су:

- t^I и t^{II} - деформациони коефицијенти за прву и другу фазу,
- φ_1^I - деформација на крају прве фазе и
- φ_1 - тренутна деформација у другој фази (независна променљива).

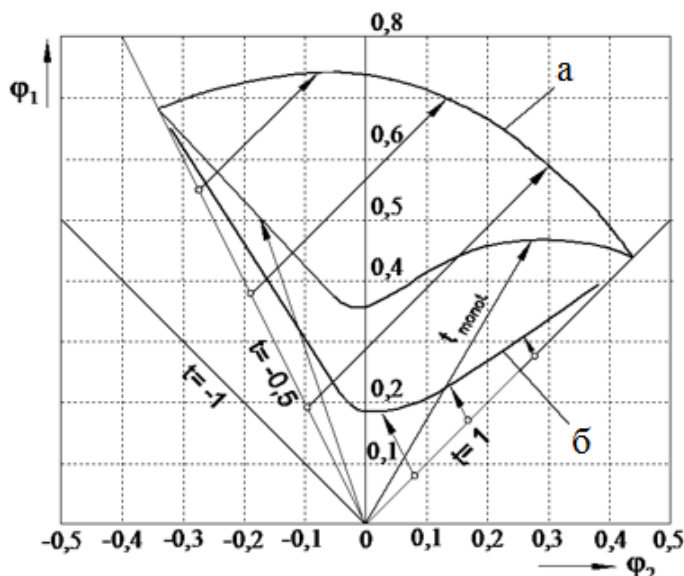
До граничне деформације могуће је стићи различитим комбинацијама правца путања и износа деформација. На слици 8 под "а", приказане су две двофазне шеме. У првој фази деформисање се изводи са једним напонско-деформационим стањем до одговарајуће деформације на крају те фазе. У другој фази остварује се лепеза путања, односно напонско деформационих шема до постизања граничних деформација. Треба имати у виду да се у другој фази обликује серија епрувета и свака појединачна путања захтева једну епрувету. Због тога је потребно у првој фази деформисати довољно материјала.



Слика 8. Сложене историје деформисања са константним деформацијама на крају претходних фаза

Под "б" је приказан трофазни процес. Испрекиданом линијом, у делу слике под "а", дата је крива дијаграма граничне деформације при монотонном деформисању.

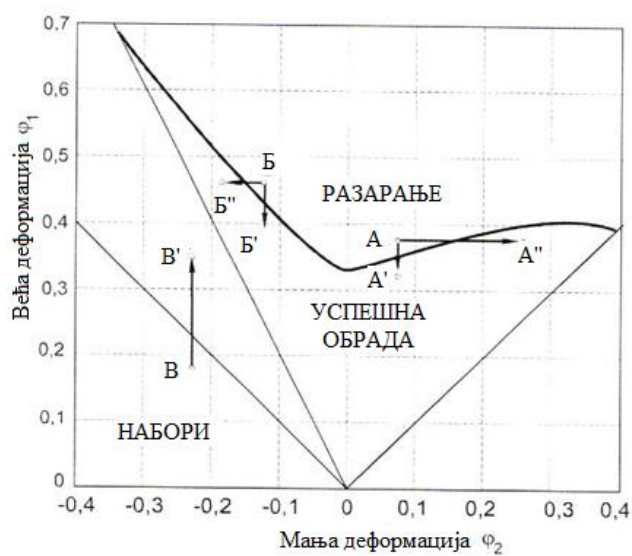
Другачији приступ је приказан на слици 9. У првој фази правац путање је константан, али крај те фазе изводи се при различитим деформацијама. У другој фази нема промене правца путања, него се распон по оси φ_2 остварује само различитим вредностима деформација на крају прве фазе (односно претходних фаза, ако је процес вишефазан). Најповољнији облик историје деформисања (крива ДГД а, на слици 9), с обзиром на вредност граничних деформација, описан је ознаком $(/-0,5 /1 / \varphi_1^I)$, а најнеповољнији (ДФД б) ознаком $(/1 /-0,5 / \varphi_1^I)$. Очигледно, деформација на крају прве фазе је променљива величина за ове случајеве, док су правци путања константни.



Слика 9. Сложене историје са променљивим деформацијама на крају претходних фаза

На слици 10 приказан је утицај сложене историје деформације дате ознакама $(/-0,5 /t^{II} /0,172)$ и $(/1 /t^{II} /0,172)$.

померања критичних тачака у безбедну зону ДГД. Измене могу да се остваре реконструкцијом радног комада, интервенцијама у алату, променом контактних услова итд.



Слика 11. Смернице за решавање критичних деформација

3. ДЕФОРМАЦИОНО ОЈАЧАЊЕ

Током процеса хладног пластичног обликовања са повећањем остварене пластичне (трајне) деформације расте напон течења (овде посматран уопштено) потребан да се процес континуално одвија. Материјал се опире деформисању и у складу са његовим особинама треба деловати све већим и већим деформационим силама. Управо тај ефекат израженог пораста напона течења, са повећањем пластичне деформације, праћен смањењем пластичности материјала, представља деформационо ојачање.

Ефекат ојачања зависи од:

- материјала (хемијски састав, структура, стање, особине),
- степена остварене пластичне деформације,
- температуре обраде и
- брзине деформације.

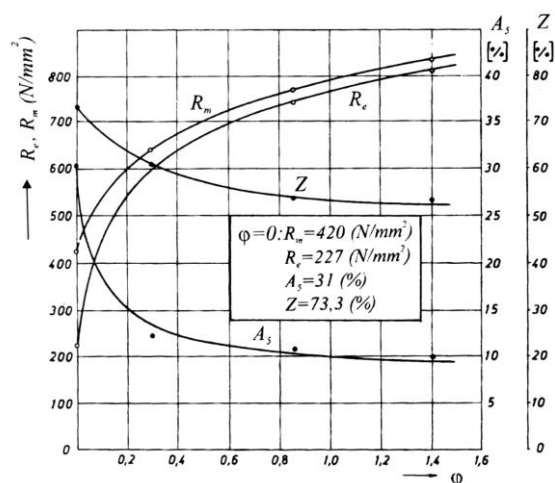
Најбољи начин за квантификовање деформационог ојачања је одређивање кривих течења или кривих ојачања. Оне представљају зависност уопштеног напона течења, односно деформационог отпора (деформационе чврстоће) од остварене еквивалентне (ефективне) пластичне деформације. Док процес пластичног обликовања траје, деформациони отпор је једнак еквивалентном напону, према енергетском услову пластичности. Треба напоменути да у општем случају напрезања еквивалентни напон може да буде и мањи од деформационе чврстоће која представља критични напон потребан да се оствари трајно деформисање. У случају када је еквивалентни напон мањи од деформационог отпора заправо и нема пластичног деформисања.

Поступак добијања кривих течења је експериментални и углавном се заснива на остваривању једноосних напонских стања затезања или притиска. Деформационо ојачавање и криве течења не зависе од напонског стања и представљају универзалну карактеристику материјала. При једноосним напонским стањима, релативно једноставним експерименталним поступком могуће је прецизно дефинисати промену еквивалентног напона и еквивалентне деформације.

3.1 Ефекат деформационог ојачања

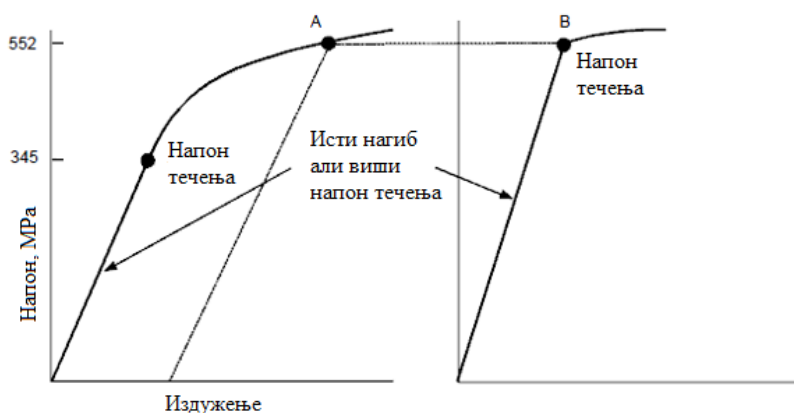
При обликовању у хладном стању са порастом степена деформације расту и сви показатељи отпорности материјала - граница течења, затезна чврстоћа, тврдоћа итд., али истовремено долази до смањења пластичности материјала, односно до пада жилавости (слика 12). Интензитет ефекта ојачавања највише зависи од материјала. Сматра се да је ефекат ојачавања последица стварања дислокација и њиховог нагомилавања у материјалу иако он још није потпуно разјашњен на микро и субмикро нивоу.

Дијаграм на слици 12 добијен је затезањем 4 кратке епрувете. Материјал прве епрувете није претходно пластично деформисан ($\varphi=0$) и виде се вредности поменуте 4 карактеристике. Материјал друге епрувете је претходно сабијен до деформације око 30%, а затим подвргнут затезању. Видљив је значајан пораст R_m и R_e и значајно смањење A_5 и Z . Тренд промене је настављен са порастом претходне деформације на ~85% и 140%.



Слика 12. Ефекат ојачавања - пораст својстава отпорности материјала (напона течења и затезне чврстоће) и пад својстава пластичности (издужења (A_3) и сужења (Z))

Значај деформационог ојачања види се при процесима пластичног обликовања металних материјала у хладном стању када се тражи да карактеристике материјала, пре свих граница течења и тврдоћа, буду високе на уштрб пластичности и жилавости. Процес се састоји из оптерећивања материјала до напона који лежи изнад тренутне вредности границе течења материјала а истовремено испод напона максималне чврстоће материјала (зона равномерног деформисања). Услед пораста оптерећења материјал тежи да се одупре деформисању при чему расте напон течења, односно деформациони отпор. Уколико се престане са дејством силе (и изврши потпуно растерећење), а затим материјал поново оптерети, нову границу течења ће представљати вредност напона у тренутку почетка растерећења (слика 13).



Слика 13. Илустрација деформационог ојачања

3.2 Криве ојачања

Криве ојачања представљају зависност уопштеног напона течења (деформационог отпора) од остварене ефективне пластичне деформације за дате услове. Криве ојачања се одређују у условима једноосних напонских стања јер је тада остварени напон течења једнак еквивалентном напону односно деформационом отпором. Криве ојачања се могу изразити на три начина, зависно од показатеља деформације и то као:

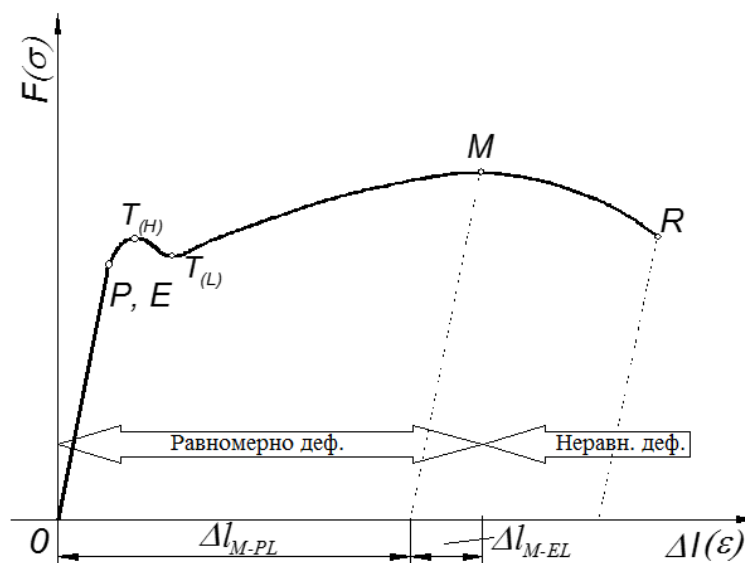
- криве ојачања I реда (K у зависности од ϵ),
- криве ојачања II реда (K у зависности од ψ),
- криве ојачања III реда (K у зависности од ϕ).

Где ε представља релативну деформацију, ψ сужење (контракцију) попречног пресека, а ϕ природну (логаритамску) деформацију.

С обзиром да је у сложеним процесима пластичног обликовања тешко одредити поједине напоне и деформације, за експерименталне услове одређивања кривих течења најчешће се користе једноставни процеси деформисања, тачније једноосна напонска стања затезања и притиска, јер се код њих зависност еквивалентног напона од еквивалентне деформације може релативно лако одредити.

3.2.1 Одређивање кривих ојачања затезањем

Испитивање једноосним затезањем се стандардно користи за одређивање основних механичких карактеристика материјала: затезне чврстоће, границе течења, модула еластичности, издужења при разарању, контракције (сужења), попречног пресека итд. Паралелно са тим могуће је на основу криве затезања (слика 14) дефинисати криву ојачања.



Слика 14. Дијаграм затезања

Процес затезања се може поделити у две фазе. Граница је тренутак постизања максималне силе, тачка М на слици 14. У првој фази одвија се хомогено деформисање и влада једноосно напонско стање. Постоји један главни напон σ_1 уједно једнак еквивалентном напону σ_e према изразу: $\sigma_e = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$. Док траје пластично деформисање еквивалентни напон је једнак деформационом отпору К. Дакле, од тренутка достизања границе течења (тачке $T_{(H)}$ или $T_{(L)}$ на слици 2.3) па до тренутка постизања максималне силе (тачка М) треба успоставити везу између силе затезања и стварног напона σ_1 који је једнак σ_e односно К.

$$\sigma_1 = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} \cdot \frac{A_0}{A} = \frac{F}{A_0} (1 + \varepsilon) = \frac{F}{A_0} e^{\phi} = \sigma_e = K \quad (9)$$

Једноставност те везе омогућава услов о непроменљивости запремине током пластичног обликовања.

$$V_0 = V = const. \quad (10)$$

$$V_0 = A_0 l_0 = V = A l \quad (11)$$

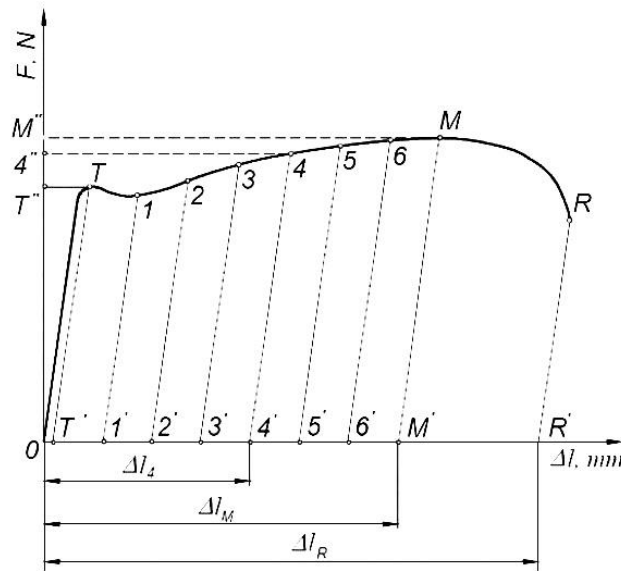
$$\frac{l}{l_0} = 1 + \varepsilon = e^{\phi} = \frac{A_0}{A}; \quad \psi = 1 - \frac{1}{1 + \varepsilon} = 1 - \frac{1}{e^{\phi}} \quad (12)$$

Еквивалентна деформација једнака је природној деформацији дужине епрувете.

$$\varphi_e = \varphi_1 = \ln \frac{1}{l_0} ; \varphi_2 = -\frac{1}{2} \varphi_1 ; \varphi_e = \varphi_3 = -\frac{1}{2} \varphi_1, \text{ при чему за општи случај}$$

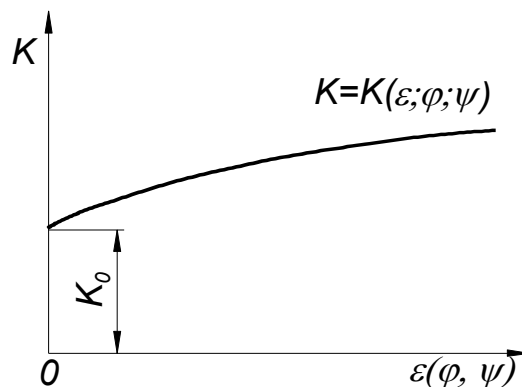
$$\sigma_e = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (13)$$

У предходним изразима F је сила затезања, A површина попречног пресека, l дужина испитиване епрувете. То су величине које се мењају током деформисања. A_0 је почетна површина попречног пресека, l_0 почетна дужина епрувете и то су константне вредности. ε је релативна, φ природна, логаритамска деформација, а ψ контракција (сужење) попречног пресека.



Слика 15. Одређивање кривих ојачања затезањем

На слици 15 је приказан поступак одређивања криве течења који се састоји у одабиру одређеног броја тачака из области равномерног деформисања. Затим се изабране тачке пројектују на апсцису (у циљу одређивања вредности пластичне деформације) под идентичним углом као и линеарни (почетни) део криве. Такође, тачке се пројектују и на ординатну осу и одређују одговарајуће вредности силе F . Када се на вредности са дијаграма затезања у области пластичног деформисања примени израз (9) добија се зависност деформационог отпора од еквивалентне деформације, односно крива ојачања или крива течења.



Слика 16. Крива ојачања

Недостатак једноосног затезања је релативно мали износ максималне деформације хомогеног деформисања (тачка М). За нискоугљеничне челике је то око 30% што може бити

недовољно. Постоје два могућа решења: коришћење другог експерименталног поступка или дефинисање аналитичких апроксимација. Алтернативни поступак је сабијање цилиндра, али ту се јавља проблем контактнoг трења, које битно ремети хомогеност деформисања, односно једноосно напонско стање. Различитим мерама утицај трења се може смањити на прихватљиву меру. Код лимова, међутим, сабијање није могуће применити, али се могу применити поступци засновани на развлачењу.

3.2.1 Аналитичке апроксимације кривих ојачања

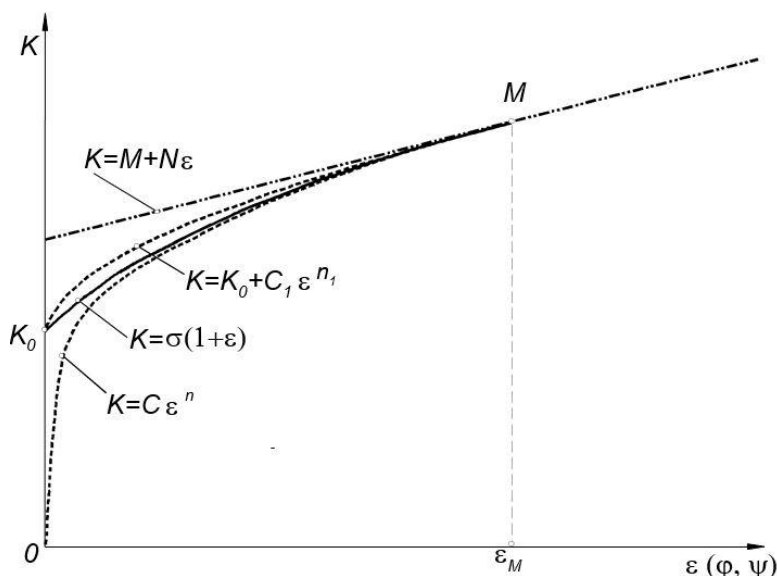
Аналитичке апроксимације су одговарајуће математичке функције које могу да замене експериментално одређену криву ојачања. Углавном су то две експоненцијалне (изрази 14 и 15) и једна линеарна функција (16). Показатељи деформације могу да буду различити, али се најчешће користи логаритамска деформација φ .

$$K = C \cdot \varphi^n \quad (14)$$

$$K = C + C \cdot \varphi^m \quad (15)$$

$$K = M + N \cdot \varphi \quad (16)$$

Облик све три апроксимационе функције види се на слици 17 упоредо са експерименталном кривом. Највећу примену има апроксимација 14 иако при малим деформацијама (до око 5%) највише одступа од експерименталне криве. Међутим, то одступање није од већег практичног значаја јер кад је пластична деформација једнака 0 деформациони отпор има увек познату вредност једнаку граници течења.



Слика 17. Апроксимације кривих ојачања

Константе у апроксимацијама при затезању могу да се одреде на основу услова:

$$\varphi = 0 \rightarrow K = K_0 = R_P$$

$$\varphi = \varphi_M \rightarrow \frac{dF}{d\varphi} = 0 ; K = K_M \quad (17)$$

При томе важи услов о непроменљивости запремине:

$$V_0 = V = A_0 \cdot l_0 = A \cdot l = \text{const.}$$

Коначни облици апроксимација, нпр. за криву III реда имају облик:

$$K = \frac{K_M}{\varphi_M^{\varphi_M}} \cdot \varphi^{\varphi_M} \quad (18)$$

$$K = K_0 + (K_M - K_0) \cdot \left(\frac{\varphi}{\varphi_M}\right)^{\frac{K_M}{K_M - K_0} \varphi_M} \quad (19)$$

$$K = K_M \cdot (1 - \varphi_M + \varphi) \quad (20)$$

Као пример наводи се извођење израза 14 за криву III реда. За тачку М важи:

$$K = K_M = \sigma_M \cdot e^{\varphi_M} = \frac{F_M}{A_0} \cdot e^{\varphi_M}; \quad \varphi = \varphi_M$$

$$K_M = C \cdot \varphi_M^n$$

$$C = \frac{K_M}{\varphi_M^n}$$

Затим се одређује експонент n. Важе следеће зависности:

$$F = A \cdot K = \frac{A_0}{e^\varphi} C \varphi^n; \quad A_0 l_0 = A l; \quad \frac{A_0}{A} = \frac{l}{l_0}; \quad \varphi = \ln \frac{l}{l_0}; \quad \frac{l}{l_0} = e^\varphi \rightarrow A = \frac{A_0}{e^\varphi}$$

$$\frac{dF}{d\varphi} = C \cdot A_0 \cdot \left(\frac{e^\varphi \cdot n \cdot \varphi^{n-1} - e^\varphi \cdot \varphi^n}{e^{2\varphi}} \right) = 0$$

$$e^\varphi n \varphi_M^{n-1} - e^\varphi n \varphi_M^n = 0 \quad /: e^\varphi$$

$$n \cdot \frac{\varphi_M^n}{\varphi_M} - \varphi_M^n = 0 \quad /: \varphi_M^n$$

$$n = \varphi_M$$

Коначно се добија:

$$K = K_M \cdot \left(\frac{\varphi}{\varphi_M}\right)^{\varphi_M}$$

Претходни израз једнак је изразу (18). Види се да треба израчунати само вредност стварног напона и природне (логаритамске) деформације у тренутку постизања максималне силе при тесту једноосног затезања. Понекад се користи и следећа варијанта апроксимације 16:

$$K = C \cdot (\varphi_0 + \varphi)^n \quad (21)$$

Константе C и n имају исте вредности као у изразу 16. Вредност φ_0 може да се одреди из следећег услова:

$$\varphi = 0 \rightarrow K = K_0 \rightarrow \varphi_0 = \left(\frac{K_0}{C}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (22)$$

Предности коришћења апроксимација су:

- веома лака примена
- нема ограничења у погледу максималне деформације и
- директна примена у софтверима за нумеричку симулацију процеса пластичног обликовања

3.3 Утицај брзине деформације и температуре на ојачање

Како је већ наглашено, уопштени напон течења (еквивалентни напон, деформациони отпор), односно деформациона чврстоћа зависи од:

- својстава материјала,
- степена и брзине деформације и
- температуре и стања структуре.

Са повећањем брзине деформације ($\dot{\phi}$) расте и деформациони отпор (K). На вишим температурама, утицај брзине деформације на K је већи него на нижим температурама, пре свега због структурних појава везаних за процес рекристализације. При повећању $\dot{\phi}$ преостаје мање времена за рекристализацију, па ће K расти, према слици 18.

Експерименталним испитивањима је утврђено да се на $T = 20^\circ\text{C}$ при повећању $\dot{\phi}$ за 10 пута у односу на брзине лабораторијских машина ($0,004 - 0,008\text{s}^{-1}$), K повећава за 5-10%. При повећању $\dot{\phi}$ за 1000 пута, K се повећава за 16-34%. Међутим, при топлој обради и повећању $\dot{\phi}$ за 1000 пута, K се повећава 200-300% (2-3 пута).

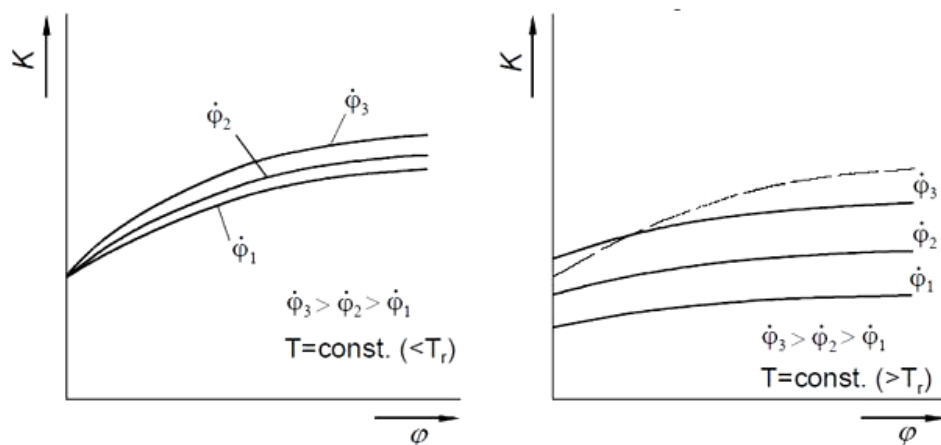
Испитивања су показала да важи однос:

$$\frac{K}{K_0} = \left(\frac{\dot{\phi}}{\dot{\phi}_0}\right)^m \text{ где су:}$$

K и K_0 -деформациони отпори при брзинама $\dot{\phi}$ и $\dot{\phi}_0$,

m - брзински коефицијент који зависи од врсте материјала и температуре процеса деформисања (за топлу обраду износи приближно 0.1 – 0.22).

При хладној обради (температура процеса обликовања T знатно мања од температуре почетка рекристализације T_r) доминира утицај степена деформисања (слика 18, лево). При топлој обради утицај брзине је израженији (слика 18, десно).



Слика 18. Утицај степена деформације, брзине и температуре на деформациони отпор (хладна обрада - лево, топла обрада - десно)

Већи нагиб кривих на слици 18 лево показује велики утицај степена деформације ϕ , а мали размак између кривих мали утицај $\dot{\phi}$. На слици 18 десно, већи размак између кривих илуструје утицај $\dot{\phi}$.

Уоачавамо да су криве течења за топлу обраду спуштене у односу на хладну, а разлог за то је присутност процеса рекристализације на температурама топле обраде.

У пракси се често користе поједностављени изрази:

$K = a \cdot K_0$ (за деформисање у хладном стању, при чему је $K_0 = R_p$)

$K = a \cdot R_M$ (за деформисање у топлом стању)

Емпиријски коефицијент $a \approx 1,05 \div 4$ зависи од односа $\dot{\varphi}/\dot{\varphi}_0$ и T/T_r . Даје се у одговарајућим препорукама.

Генерално посматрано, може се закључити да важе следеће зависности:

$K_{HL} = K(\varphi, \text{материјал}),$

$K_{TOPL} = K(\dot{\varphi}, T, \text{материјал}).$

3.4 Експонент деформационог ојачања - "n" фактор

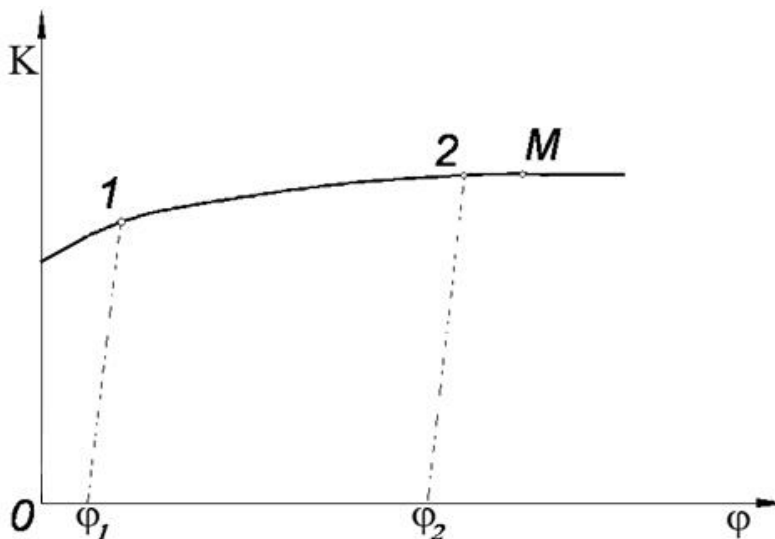
3.4.1 Методе одређивања "n" фактора

У поглављу 3.2.2 дато је извођење формуле за аналитичку апроксимацију криве течења експоненцијалног типа без слободног члана и ту се појављује експонент n . Како он у математичком смислу директно утиче на нагиб криве течења лако се дошло до закључка да може да представља врло погодан параметар деформабилности јер непосредно илуструје интензитет ефекта деформационог ојачавања. У поменутом поглављу показано је да важи следећа веза:

$$n = \varphi_M,$$

односно да је "n" фактор бројно једнак природној деформацији при максималној сили у тесту испитивања једноосним затезањем. Међутим, пошто се вредност ове деформације често не може одредити довољно тачно развијени су поступци којима се једноставније долази до тачнијих резултата.

Први и најчешће примењиван поступак илустрован је на слици 19.



Слика 19. Избор тачака за различите вредности деформационе чврстоће

Потребно је на кривој течења одабрати две тачке (1 и 2) са одговарајућим вредностима деформационих чврстоћа :

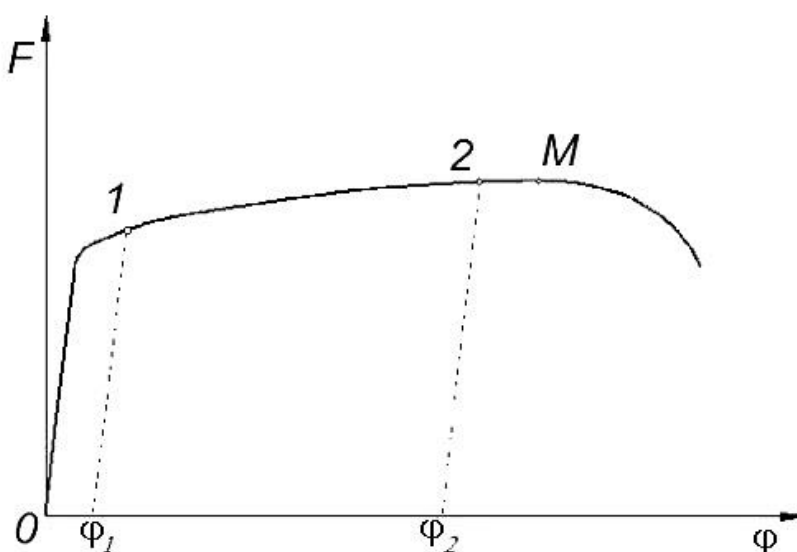
$$K = C \cdot \varphi^n \quad K_1 = C \cdot \varphi_1^n \quad \text{и} \quad K_2 = C \cdot \varphi_2^n \quad (23)$$

Препоручљиво је да разлика између деформација у тачкама 1 и 2 буде што већа, али наравно у области хомогеног деформисања. Тачка 1 треба да буде довољно удаљена од границе течења. Тачка се бира на овај начин како би се избегла могућност појаве нетачности у вези са евентуалним дисконтинуитетом криве затезања у области преласка из еластичне у пластичну област. Такође, положај тачака је изабран на овај начин и због разлике која постоји између експерименталне криве и апроксимационих једначина у области мањих деформација. Прва тачка не би требало да буде превише удаљена од границе течења, како се не би превише приближила другој тачки, јер би то довело до недовољне тачности n фактора. Друга тачка мора бити у зони хомогеног деформисања, односно испред тачке M , али при том не сме бити превише далеко од M , да се не би претерано приближила првој тачки. Закључује се да тачке треба да буду на што већој удаљености једна од друге, како би тачност читавања промене силе и напона била што већа, а да при томе буду у поменутим дозвољеним границама.

Када су у питању нискоугљенични челични лимови, положај прве тачке бира се око издужења од 5%, а друга тачка погодна је да буде на издужењу око 5% мањем од издужења у тачки M . Најбоље је да се за сваки конкретан материјал претходно уради испитивање затезањем и правилно дефинишу тачке 1 и 2.

Понекад су одступања положаја тачака 1 и 2 већа, а у случају испитивања дефлексионих појава код лимова са израженим еластичним особинама, може се захтевати одређивање " n " фактора у области малих деформација, на пример 2 до 4% или 2 до 5% итд.

Тачке приказане на кривој течења (слика 19) одговарају тачкама на кривој затезања (слика 20).



Слика 20. Крива затезања која одговара кривој течења са сл. 19

После краћег сређивања претходног израза доћи ће се до: $\log \frac{K_2}{K_1} = \log \left(\frac{\varphi_2}{\varphi_1} \right)^n$, из чега следи да се експонент деформационог ојачања може наћи преко израза 24:

$$n = \frac{\log \frac{K_2}{K_1}}{\log \frac{\varphi_2}{\varphi_1}} = \frac{\ln \frac{F_2 \cdot l_2}{F_1 \cdot l_1}}{\ln \left(\frac{l_n \cdot l_2}{l_0} \right)} \quad (24)$$

Уместо вредности K_2 и K_1 са криве ојачања може се користити израз (23) чиме је могуће избећи цео поступак одређивања криве ојачања и директно са криве затезања

очитати потребне силе и деформације (израз 24). У крајњем случају, ако се претходно утврде вредности сила (и/или деформација) које треба постићи у експерименту могуће је "n" фактор одредити и без снимања дијаграма затезања.

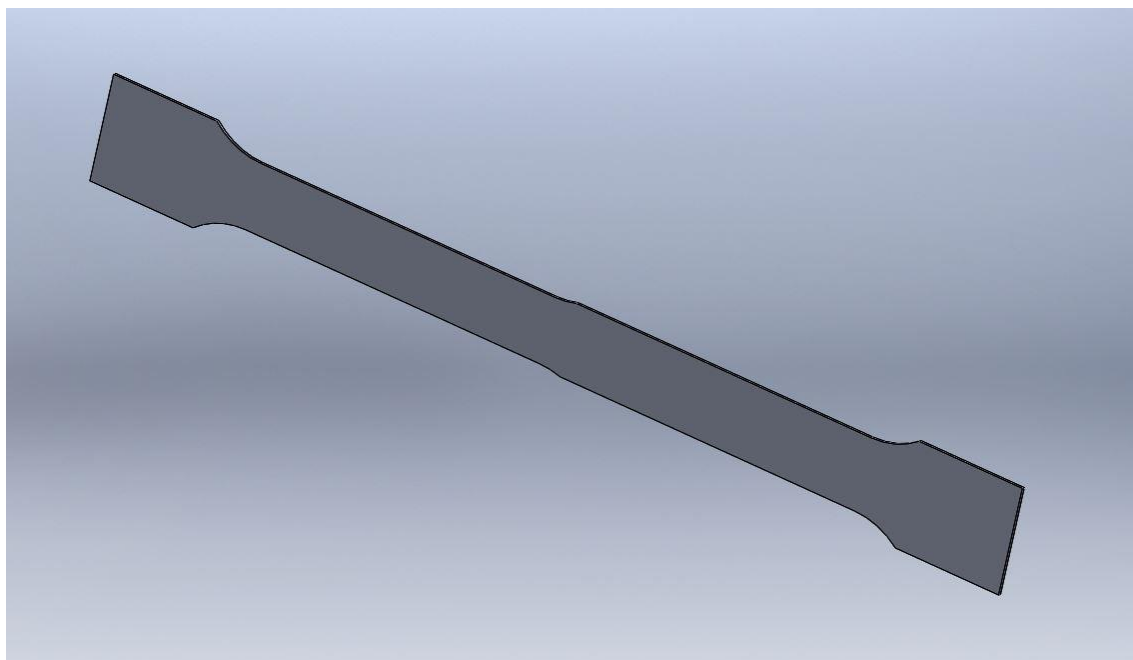
Претходни поступак показује једноставан и врло поуздан начин за експериментално одређивање "n" фактора, преко само две тачке на кривој затезања или кривој течења.

Пошто "n" фактор показује интензитет деформационог ојачања, може се закључити да на њега, поред врсте материјала, знатан утицај може имати брзина деформације и температура. Међутим, како се "n" фактор као показатељ деформабилности највише користи за танке лимове, а они се у највећем броју случајева обликују у хладном стању, присутан је главни утицај врсте материјала (хемијског састава) и степена претходне деформације, односно историје деформисања, а може се занемарити утицај брзине деформације и температуре.

Степен деформације се користи у претходним изразима и непосредно утиче на добијену вредност "n" фактора. Зато је веома важно увек навести распон деформација (тачке 1 и 2 на дијаграмима 19 и 20).

3.3.4.1 Други поступци одређивања "n" фактора

У овом раду користиће се поступак затезања тзв. степенасте епрувете. Она заправо има две зоне са различитим ширинама (слика 21 и 22). Зоне се деформишу до различитих деформација, али сила затезања има јединствен интензитет, кога је могуће изразити на једноставан начин.



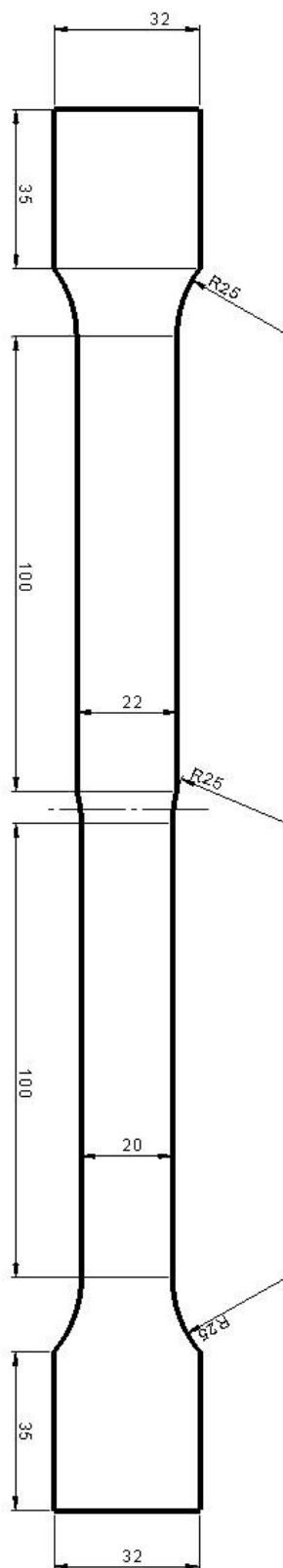
Слика 21. Степенаста епруветаса две мерне зоне (3D изглед)

За обе мерне зоне важи :

$$K_1 = C \cdot \varphi_1^n; K_2 = C \cdot \varphi_2^n \text{ односно:}$$

$$\frac{F}{A_1} = C \cdot \varphi_1^n; \frac{F}{A_2} = C \cdot \varphi_2^n$$

A_1 и A_2 су стварне површине попречног пресека епрувете.



Слика 22. Геометрија двостепене епрувете

Поделом леве једначине десном и логаритмовањем добија се формула :

$$n = \frac{\ln \frac{A_2}{A_1}}{\frac{\varphi_1}{\varphi_2}}$$

На основу става о непроменљивости запремине у процесима пластичног обликовања може се писати (за ужу зону 1 и ширу зону 2):

$$s_1 \cdot b_1 \cdot l_1 = s_{01} \cdot b_{01} \cdot l_{01}$$

$$s_2 \cdot b_2 \cdot l_2 = s_{02} \cdot b_{02} \cdot l_{02} \text{ при чему}$$

$$A_1 = s_1 \cdot b_1 ; A_2 = s_2 \cdot b_2 \text{ Делењем се добија:}$$

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{s_{02} b_{02} l_{02} l_1}{s_{01} b_{01} l_{01} l_2}$$

Пошто су почетне дебљине материјала за обе зоне једнаке ($s_{01} = s_{02}$) добија се коначан израз за "n" фактор:

$$n = \frac{\ln \frac{b_{02} \cdot l_{02} \cdot l_1}{b_{01} \cdot l_{01} \cdot l_2}}{\frac{\ln \frac{l_1}{l_{01}}}{\ln \frac{l_2}{l_{02}}}} \quad (25)$$

- l_{01} и l_{02} - почетне дужине уже и шире зоне код степенасте епрувете
- b_{01} и b_{02} - почетне ширине уже и шире зоне код степенасте епрувете
- l_1 и l_2 - дужина уже и шире зоне код степенасте епрувете после извршеног затезања.



Слика 23. Изглед степенасте епрувете после затезања

За практично извођење експеримента важно је тачно измерити све поменуте величине пре и после затезања. Поступак се обично изводи у три фазе код пластичних материјала, а у две фазе код мање пластичних. Због тога је потребно претходном пробом дефинисати потребне силе (и/или издужења) на крају сваке фазе. Наравно, на крају сваке фазе експеримента потребно је извршити растерећење, скидање епрувете и мерење. Коначан резултат је средња вредност резултата добијених у фазама испитивања. Изглед степенасте епрувете дат је на слици 23.

3.3.4.2 Механизам утицаја "n" фактора на деформабилност

Утицај овог фактора на деформабилност, приметно је већа у условима нехомогеног деформационог поља. Пример ове тврдње огледа се у случају када су деформације јако сконцентрисане око критичног места отпреска. Већа вредност овог фактора утиче да долази до интензивнијег ојачања на месту највећих деформација, што за последицу има отежавање даљег раста деформације у тој зони. У складу са тим, суседне зоне се више деформишу,

даље се деформације шире у суседне зоне све док се не прекине раст деформације на тим местима због ојачања и деформације пређу на остале зоне из околине. На овај начин, добија се знатно равномерније (хомогеније) деформационо поље, односно долази до уклањања или ублажавања појава локализованог деформисања.

Ефекат ојачавања је посебно значајан код танких лимова и то у случају када преовлађују затежући напони у равни лима, нарочито у условима када је блокиран обод комада. Из тог разлога, постоји евидентна веза између фактора деформационог ојачања и показатеља испитивања добијених Ериксеновим тестом. Уочен је висок степен корелације између овог фактора и односа напона на граници течења и затезне чврстоће R_p/R_m .

Вредност „ n “-фактора код челичних лимова креће се између 0.2 и 0.3, код месинга његова вредност је око 0.4, а код аустенитних нерђајућих челика 0.3 до 0.4. Са порастом вредности „ n “-фактора деформабилност је повољнија, нарочито у условима развлачења (деловање затежућих напона у равни лима при блокираном ободу комада). Као пример, оквирно је дата промена својства деформабилности, деформабилност код нискоугљеничних челика у зависности од вредности овог фактора:

- $n = 0.16 - 0.19$ -веома лоша деформабилност
- $n = 0.19 - 0.21$ -лоша деформабилност
- $n = 0.21 - 0.23$ -задовољавајућа (средња) деформабилност
- $n = 0.23 - 0.25$ -врло успешна деформабилност
- $n > 0.25$ -изузетно добра (одлична) деформабилност

Треба споменути да се овај фактор ретко узима самостално као показатељ деформабилности. Наиме, деформабилност се често одређује посредством " n " фактора уз друге показатеље, као што је коефицијент нормалне анизотропије (" r " фактор), показатељи граничне деформабилности итд. итд..

Вредности експонента деформационог ојачања код легираних челика су понекад знатно ниже, односно њихова обрадивост је лоша или веома лоша. Пример ове тврдње јесте лим израђен од феритног нерђајућег челика AISI 430 (X6Cr17). Наиме, вредности " n " фактора код овог челика једва прелазе 0,19 или су чак и мање од ове вредности. Значајно високе вредности овог фактора примећене су код аустенитног нерђајућег челика X5CrNi18-9 ($n \approx 0.4$), као и код неких легура кобалта где вредности " n " фактора достижу и до 0,5.

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА

4.1 План експеримента и мерна опрема

План експеримента чини одређивање експонента деформационог ојачања „n“ фактора за 8 материјала. То су лимови CuZn37 (CW 508L), DC04 (Č0146), X5CrNi18-10 (Č4580), X5CrNi17-12-2 (Č4574), 51CrV4 (Č4830), AlMg3, AlCu4Mg1Mn (2024 T3 AIR) и Cu-DHP (DVP 1 Cu.38). Примењене су 3 методе објашњене у поглављима 3.4.1.1 и 3.4.1.2

Прва метода подразумева једноосно затезање до кидања и дефинисање положаја тачака 1 и 2 на дијаграму затезања. Овде је усвојена процедура да се распон од тачке М до тачке Т која се односи на границу течења подели на 10 делова. После тачке Т означи се 1/10 распона Т-М и то је тачка 1. Пре тачке М такође се означи 1/10 распона и то је положај тачке 2. Дакле, од тачке 1 до тачке 2 је 8/10 распона Т-М.

Друга метода, веома слична првој, подразумевала је затезање, али не до кидања него приближно до максималне силе, која је прецизно одређена првом методом. Друга метода практично значи понављање првог поступка и тиме добијање поузданог и референтног резултата.

Трећа метода је заснована на примени двостепене епрувете и њеном затезању у две или три фазе. Износи деформације (и/или силе) дефинисани су претходном пробом.

Пре почетка експеримента потребно је припремити епрувете, обележити мерна места, измерити почетне мере епрувета (дужину и ширину).

Епрувете су исецане на машини за сечење воденим млазом. Таквим поступком се добија релативно груба храпава површина реза тако да је била потребна мања механичка дорада фином турпијом и брусним папиром. Резање абразивним воденим млазом (“Water jet” технологија) спада у нестандартне поступке обраде резања које се односе на механичко острањивање материјала са обрадка. Абразивни водени млаз је танак слој мешавине воде под високим притиском и песка, тј. абразива, коју та вода потискује кроз дизну. На слици 24. приказано је сечење епрувете овом технологијом.

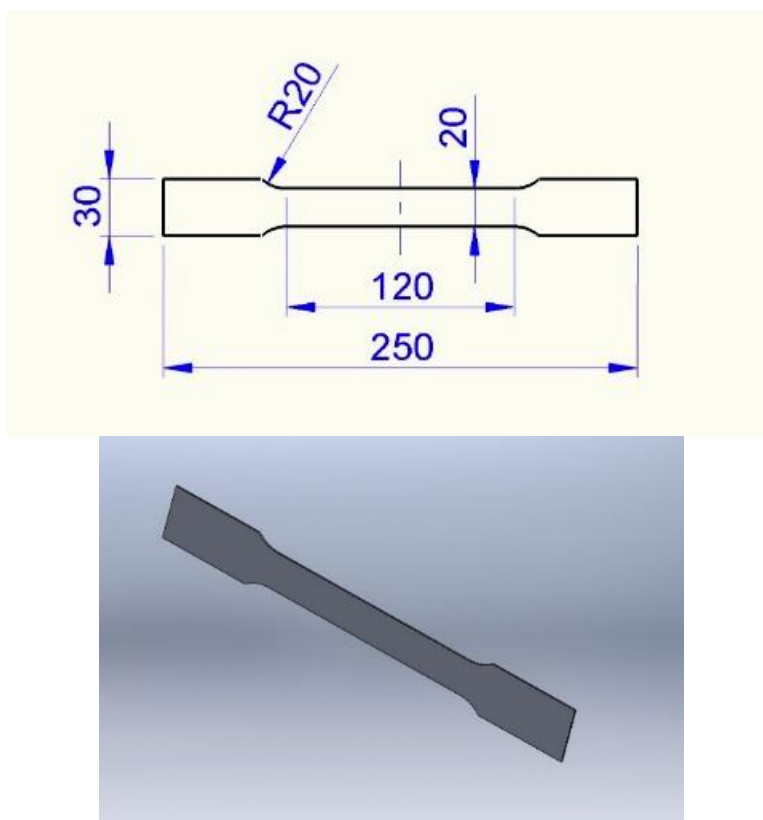
За мерење димензија користи се дигитално кљунасто мерило, и микрометар. Тачност очитавања оба мерила је 0,01 mm.

Затезање епрувета изведено је на машини Zwick/Roell Z100, коју је потребно припремити пре старта експеримента. После затезања потребно је измерити дужину епрувете. Код степенасте епрувете обележавање почетне дужине је на два места, па је било потребно премерити дужину и уже и шире зоне. Геометрија и 3D изглед стандардне епрувете дати су на слици 25, а степенасте у поглављу 3.4.1.1 на слици 21.

Треба напоменути да ће се при приказу резултата у наставку рада користити претходно поменути термини: "прва, друга и трећа метода" без поновних и накнадних објашњења.



Слика 24. Израда епрувета абразивним воденим млазом ("Waterjet")



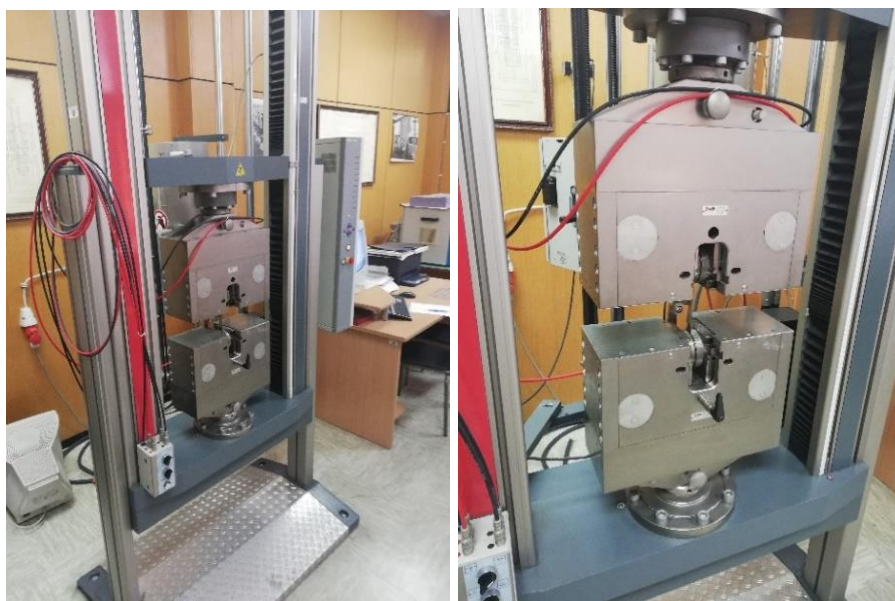
Слика 25. Стандардна епрувета за испитивање затезањем

Затезањем епрувете добија се, поред осталог, дијаграм зависности силе од процентуалног издужења ($F, N - A, \%$), који се користи за одређивање експонента деформационог ојачања, „ n “ фактора првом и другом методом.

Мерна опрема

За извођење експеримента коришћена је универзална механичка машина за испитивање материјала Zwick/Roell Z100 (слика 26) са компјутерским управљањем, која спада у савремене лабораторијске уређаје. Машина се налази у Лабораторији за обраду деформисањем и машинске материјале на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу.

Уређај Zwick/Roell Z100 има пнеуматске стезне чељусти које захтевају напајање компримованим ваздухом притиска до 10 бара, који обезбеђује посебан компресор. Како је поменуто, мерни систем је компјутеризован, што подразумева постојање потребних мерних уређаја за аутоматско читавање, обраду и приказ података. Користи се посебан професионални софтвер TestXpert. Развијен је од стране произвођача и његова особеност је рад у Windows окружењу. Софтвер омогућава комплетну припрему и извођење експерименталних процедура као и презентацију резултата. Посебно су корисне могућности експорта комплетних извештаја, али и појединачних резултата и нумеричких фајлова свих дијаграма итд.



Слика 26. Мерни систем Zwick / RoellZ 100

За мерење ширине епрувета коришћен је класичан микрометар (слика 27). Микрометар је мерни инструмент код кога је тачност читавања измерене вредности 0,01 мм. Слично нонијусу, мерило се састоји од помичне и непомичне скале, али је код овог инструмента помична скала на цилиндричкој површини и покреће се микрометарским завртањем са спојницом. На линеарној непокретној скали читавају се цели и половине милиметра, а број стотих делова се читава на кружној обртној скали.



Слика 27. Микрометар

За мерење дужине коришћено је дигитално кљунасто помично мерило (слика 28). За ово мерило у пракси се често користе и називи "шублер" и нонијус. То је ручни мерни

уређај за разна прецизна мерења спољних и унутрашњих мера. Уобичајена тачност читавања механичког кљунастог мерила износи $1/10$ милиметара за мерни опсег од 0 до око 100-150 mm. Старије верзије мерила су чисто механичке (тачности обично $1/10$ mm), а савременије су дигитализоване са читавањем на LCD екрану и повећане тачности читавања ($1/100$ mm).



Слика 28. Дигитално кљунасто мерило

4.2 Примена класичне методе затезања – Резултати

Лим од легуре CuZn37

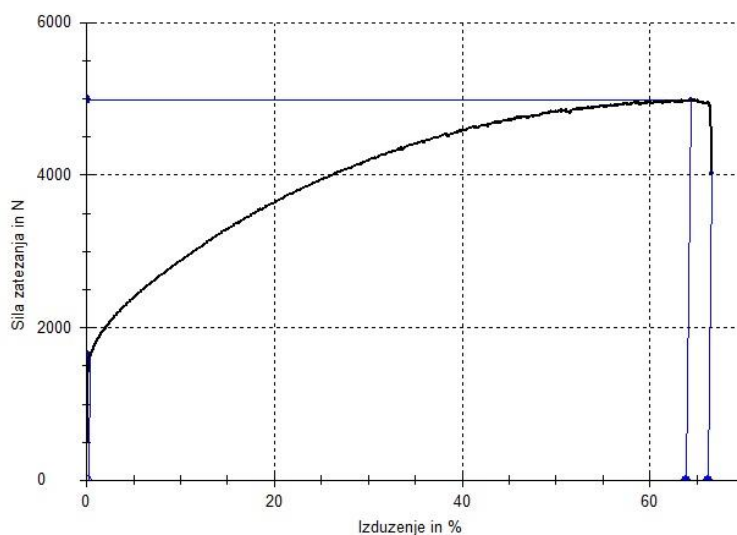
Лимови од месинга CuZn37 имају следећа општа својства: добро се пластично обликују у хладном стању, добро се електролитички полирају, имају задовољавајућу корозиону отпорност. Легура се одлично леми и добро заварује, при чему код заваривања треба бити опрезан због токсичности услед високог садржаја цинка. Ова врста лимова се користи за добијање разних делова дубоким извлачењем, у текстилној индустрији, за траке хладњака, разне шупље и друге предмете у машинству, у електроиндустрији, за музичке инструменте итд. Конкретни узорци су урађени од лима CuZn37 у стању R300.

Табела 1. Резултати испитивања лима CuZn37

CuZn37 дебљина 0.8 mm						
	L ₀ mm	S ₀ mm ²	R _{p0,2} , MPa	R _m , MPa	A _g %	A %
Мерење до кидања епрувете	120.00	16.08	101.80	309.92	63.90	66.18
Мерење до максималне силе	120.00	16.08	101.66	309.61	62.78	

Треба обратити пажњу да је у претходној табели (али и у свим наредним разматрањима резултата) ознака за процентуално издужење при максималној сили затезања **A_g**, а за процентуално издужење при кидању **A**. То је важно узети у обзир због могуће конфузије јер се у претходним разматрањима (нарочито у глави 3) са **A** означавала површина (овде S₀). У овој глави прихваћен је стандардни начин означавања свих величина примењен у софтверу мерног система Zwick.

Следе резултати и одређивање „n“ фактора за лим CuZn37 по првој методи.



Слика 29. CuZn37-дијаграм затезања до кидања - 90° у односу на правац ваљања

$$l_0 = 120 \text{ mm}$$

Размера за процентуално издужење:

$$U_A = \frac{60}{115,7} = 0,51 \frac{\%}{1 \text{ mm}}$$

Размера за силу:

$$U_F = \frac{6000}{92,6} = 64,7 \frac{N}{1 \text{ mm}}$$

$$Ag = 63,9$$

$$\frac{Ag}{10} = \frac{63,9}{10} = 6,39$$

$$\frac{6,39}{U_A} = \frac{6,39}{0,51} = 12,5 \text{ mm}$$

$$A_1 = 6,39\% \rightarrow l_1 = \left(\frac{A_1}{100} + 1 \right) \cdot l_0 = \left(\frac{6,39}{100} + 1 \right) \cdot 120 = 127,668 \text{ mm}$$

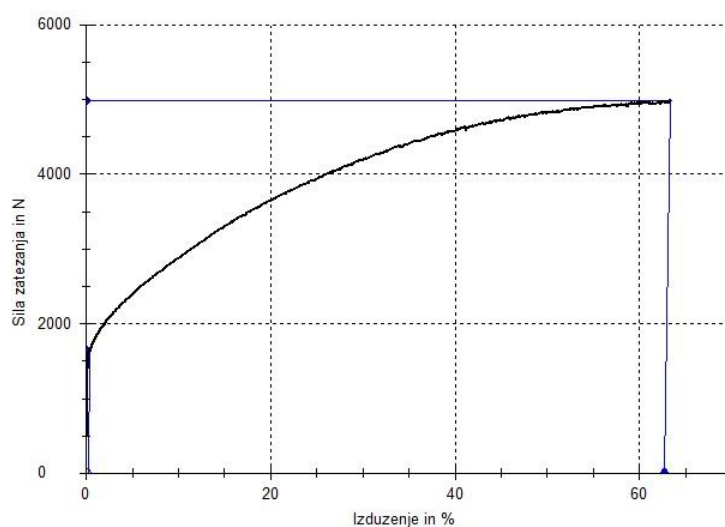
$$F_1 = 40,8 \cdot U_F = 40,8 \cdot 64,7 = 2639,76 \text{ N}$$

$$A_2 = 63,9 - 6,39 = 57,51 \% \rightarrow l_2 = \left(\frac{A_2}{100} + 1 \right) \cdot l_0 = \left(\frac{57,51}{100} + 1 \right) \cdot 120 = 189,012 \text{ mm}$$

$$F_2 = 78,75 \cdot U_F = 78,75 \cdot 64,7 = 5095,1 \text{ N}$$

$$n = \frac{\ln \frac{F_2 \cdot l_2}{F_1 \cdot l_1}}{\ln \frac{l_2}{l_0}} = \frac{\ln \frac{5095,1 \cdot 189,012}{2639,76 \cdot 127,668}}{\ln \frac{189,012}{120}} = \frac{\ln 2,86}{\ln \frac{1,575}{1}} = \frac{1,050}{0,457} = 2,30$$

У наставку су дати резултати и одређивање „n“ фактора за лим CuZn37 по другој методи.



Слика 30. CuZn37-дијаграм затезања до максималне силе - 90° у односу на правац ваљања

$$l_0 = 120 \text{ mm}$$

Размера за процентуално издужење:

$$U_A = \frac{60}{119} = 0,504 \frac{\%}{1 \text{ mm}}$$

Размера за силу:

$$U_F = \frac{6000}{96} = 62,5 \frac{N}{1 \text{ mm}}$$

$$Ag = 62,78 \%$$

$$\frac{Ag}{10} = \frac{62,78}{10} = 6,27\%$$

$$\frac{6,27}{U_A} = \frac{6,27}{0,504} = 12,456 \text{ mm}$$

$$A_1 = 6,27\% \rightarrow l_1 = \left(\frac{A_1}{100} + 1 \right) \cdot l_0 = \left(\frac{6,27}{100} + 1 \right) \cdot 120 = 127,524 \text{ mm}$$

$$F_1 = 46 \cdot U_F = 46 \cdot 62,5 = 2875 \text{ N}$$

$$A_2 = 62,78 - 6,27 = 56,51\% \rightarrow l_2 = \left(\frac{A_2}{100} + 1 \right) \cdot l_0 = \left(\frac{56,51}{100} + 1 \right) \cdot 120 = 187,812 \text{ mm}$$

$$F_2 = 78 \cdot U_F = 78 \cdot 62,5 = 4875 \text{ N}$$

$$n = \frac{\ln \frac{F_2 \cdot l_2}{F_1 \cdot l_1}}{\ln \frac{l_2}{l_0}} = \frac{\ln \frac{4875 \cdot 187,812}{2875 \cdot 127,524}}{\ln \frac{187,812}{120}} = \frac{\ln 2,497}{\ln \frac{0,447}{0,060}} = \frac{0,915}{2,008} = 0,455$$

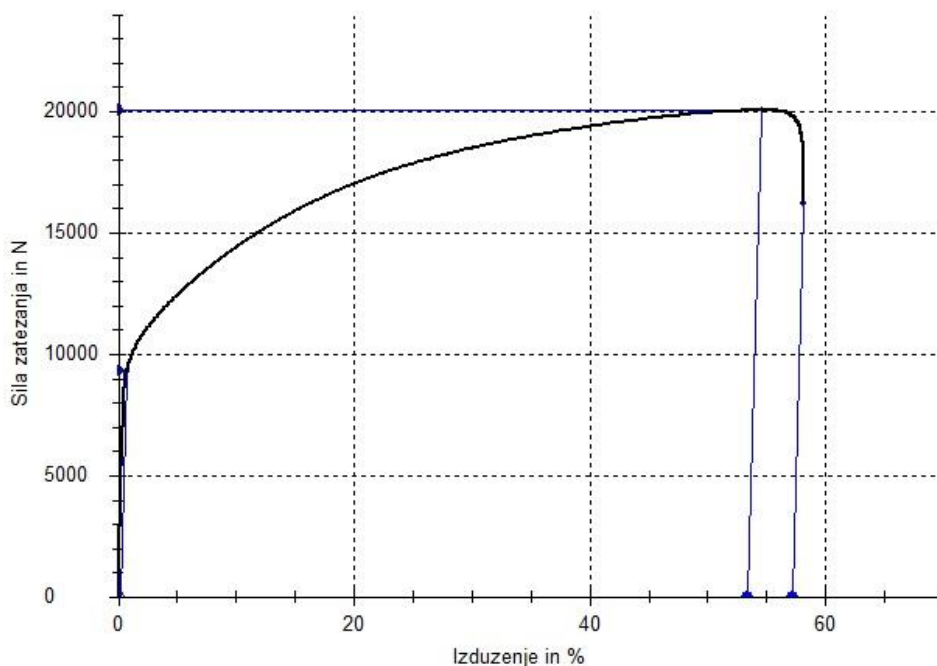
Лим од челика X5CrNi18-10

Челик X5CrNi18-10 (стара ознака Č4580) је аустенитни нерђајући челик најраспрострањенији у примени од свих нерђајућих челика. Има добру корозиону отпорност, повољну деформабилност и обрадивост другим поступцима. Добија повољан естетски изглед у полираном или брушеном стању. Приликом полирања добија површину са тзв. високим сјајем. Лимови од овог челика су познати по доброј пластичности и обрадивости поступком дубоког извлачења. Употребљава се за посуде изложене веома ниским температурама (све до температура блиских апсолутној нули) и на радним температурама до око 300°C. Користи се за разне делове уређаја и машина, за посуђе, у индустрији животнох намирница, у млекарама, пиварама итд.

Табела 2. Резултати испитивања лима X5CrNi18-10

X5CrNi18-10 дебљина 1.5 mm						
	L ₀ mm	S ₀ mm ²	R _{p0,2} , MPa	R _m , MPa	Ag %	A %
Мерење до кидања епрувете	120.00	30.53	304.65	657.64	53.4	57.20
Мерење до максималне силе	120.00	30.53	298.73	647.85	52	

Следе резултати и одређивање „n“ фактора за лим X5CrNi18-10 по првој методи.



Слика 31. X5CrNi18-10-дијаграм затезања до кидања - 0° у односу на правац ваљања

$$l_0 = 120 \text{ mm}$$

Размера за процентуално издужење:

$$U_A = \frac{40}{78} = 0.512 \frac{\%}{1 \text{ mm}}$$

Размера за силу:

$$U_F = \frac{15000}{60} = 250 \frac{N}{1 \text{ mm}}$$

$$Ag = 53,4 \%$$

$$\frac{Ag}{10} = \frac{53,4}{10} = 5,34$$

$$\frac{5,34}{U_A} = \frac{5,34}{0,512} = 10,429 \text{ mm}$$

$$A_1 = 5,34 \rightarrow l_1 = \left(\frac{A_1}{100} + 1 \right) \cdot l_0 = \left(\frac{5,34}{100} + 1 \right) \cdot 120 = 126,41 \text{ mm}$$

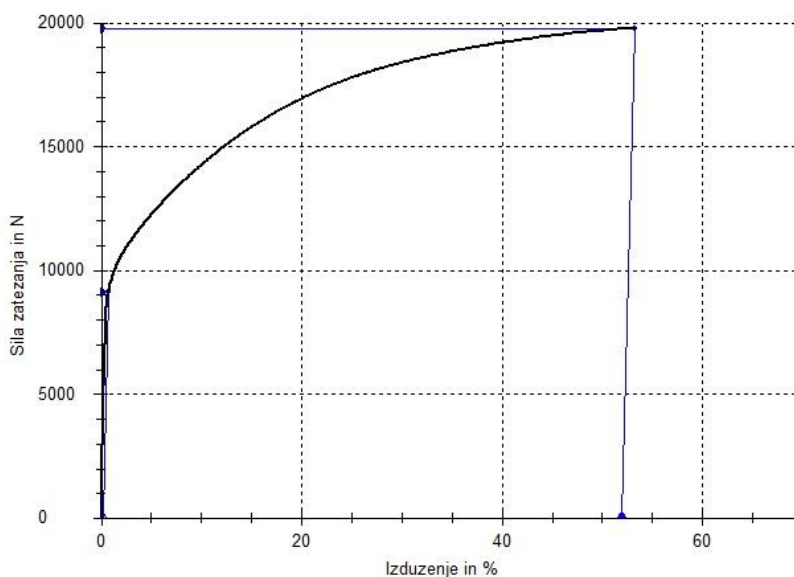
$$F_1 = 54 \cdot U_F = 54 \cdot 250 = 13500 \text{ N}$$

$$A_2 = 53,4 - 5,34 = 48,1 \% \rightarrow l_2 = \left(\frac{A_2}{100} + 1 \right) \cdot l_0 = \left(\frac{48,1}{100} + 1 \right) \cdot 120 = 177,72 \text{ mm}$$

$$F_2 = 79,5 \cdot U_F = 79,5 \cdot 250 = 19875 \text{ N}$$

$$n = \frac{\ln \frac{F_2 \cdot l_2}{F_1 \cdot l_1}}{\ln \frac{l_2}{l_1}} = \frac{\ln \frac{19875 \cdot 177,72}{13500 \cdot 126,41}}{\ln \frac{177,72}{126,41}} = \frac{\ln 3532185}{\ln \frac{0,392}{0,052}} = \frac{0,727}{2,02} = 0,359$$

У наставку су дати резултати и одређивање „n“ фактора за лим X5CrNi18-10 по другој методи.



Слика 32. X5CrNi18-10-дијаграм затезања до макс. силе - 90° у односу на пр. ваљања

$$l_0 = 120 \text{ mm}$$

Размера за процентуално издужење:

$$U_A = \frac{40}{78} = 0,512 \frac{\%}{1 \text{ mm}}$$

Размера за силу:

$$U_F = \frac{15000}{72} = 208,3 \frac{N}{1 \text{ mm}}$$

$$Ag = 52 \%$$

$$\frac{Ag}{10} = \frac{52}{10} = 5,2$$

$$\frac{5,2}{U_A} = \frac{5,2}{0,512} = 10,156 \text{ mm}$$

$$A_1 = 5,2 \rightarrow l_1 = \left(\frac{A_1}{100} + 1 \right) \cdot l_0 = \left(\frac{5,2}{100} + 1 \right) \cdot 120 = 126,24 \text{ mm}$$

$$F_1 = 61,5 \cdot U_F = 61,5 \cdot 208,3 = 12810,4 \text{ N}$$

$$A_2 = 52 - 5,2 = 46,8 \% \rightarrow l_2 = \left(\frac{A_2}{100} + 1 \right) \cdot l_0 = \left(\frac{46,8}{100} + 1 \right) \cdot 120 = 176,16 \text{ mm}$$

$$F_2 = 95 \cdot U_F = 95 \cdot 208,3 = 19788,5 \text{ N}$$

$$n = \frac{\ln \frac{F_2 \cdot l_2}{F_1 \cdot l_1}}{\ln \frac{l_2}{l_0}} = \frac{\ln \frac{19788,5 \cdot 176,16}{12810,4 \cdot 126,24}}{\ln \frac{176,16}{120}} = \frac{\ln 2,155}{\ln \frac{0,383}{0,05}} = \frac{0,768}{2,036} = 0,377$$

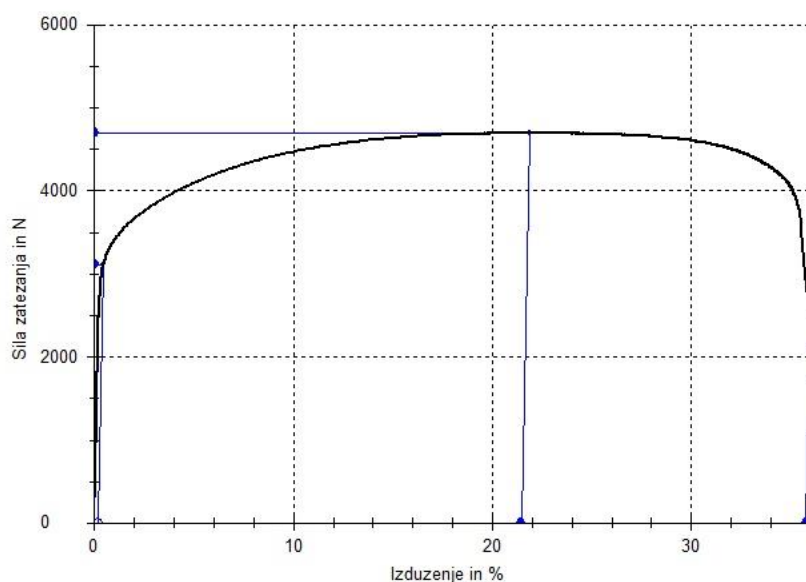
Лим од челика DC04

Хладноваљани лимови од нискоугљеничног умиреног челика DC04 (стара ознака Č0148) су познати по одличној деформабилности и лошој корозионој отпорности. Погодни су за заваривање и наношење превлака (металне превлаке, лакирање итд.). Због својих особина и ниске цене користе се у аутомобилској индустрији, за производњу беле технике, у металопрерађивачкој индустрији, за производњу амбалаже, итд. итд.

Табела 3. Резултати испитавања лима DC04

DC04 дебљина 0.8 mm						
	L ₀ mm	S ₀ mm ²	R _{p0,2} MPa	R _m MPa	Ag %	A %
Мерење до кидања епрувете	81.6	16.48	188.91	285.07	21.46	35.77
Мерење до максималне силе	81.6	16.48	162.67	283.32	21.58	

Следе резултати и одређивање „n“ фактора за лим DC04 по првој методи.



Слика 33. DC04-дијаграм затезања до силе кидања - 90° у односу на правац ваљања

$$l_0 = 81,6 \text{ mm}$$

Размера за процентуално издужење:

$$U_A = \frac{30}{116} = 0,258 \frac{\%}{1 \text{ mm}}$$

Размера за силу:

$$U_F = \frac{6000}{95,5} = 62,82 \frac{N}{1 \text{ mm}}$$

$$Ag = 21,46 \%$$

$$\frac{Ag}{10} = \frac{21,46}{10} = 2,146$$

$$\frac{2,146}{U_A} = \frac{2,146}{0,258} = 8,31 \text{ mm}$$

$$A_1 = 2,146 \rightarrow l_1 = \left(\frac{A_1}{100} + 1 \right) \cdot l_0 = \left(\frac{2,146}{100} + 1 \right) \cdot 81,6 = 83,351 \text{ mm}$$

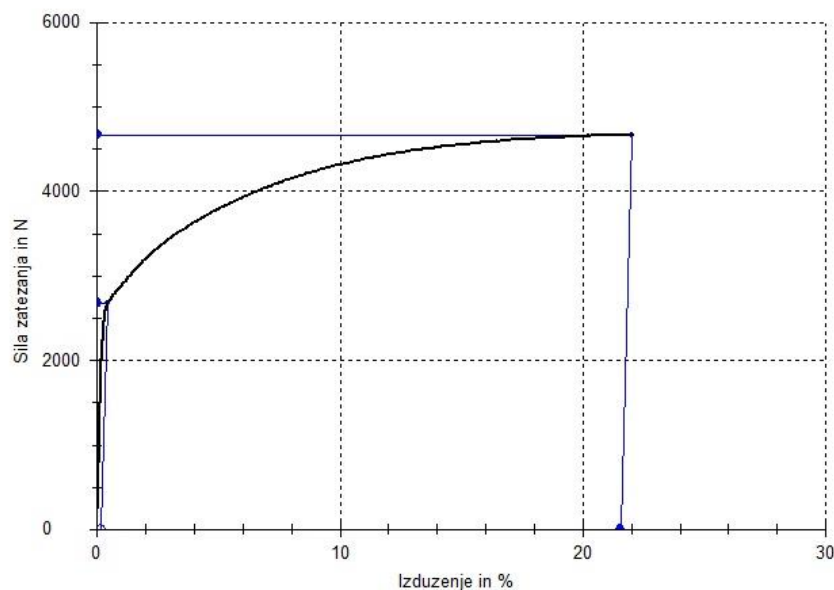
$$F_1 = 59,5 \cdot U_F = 59,5 \cdot 62,82 = 3737,79 \text{ N}$$

$$A_2 = 21,46 - 2,146 = 19,314 \% \rightarrow l_2 = \left(\frac{A_2}{100} + 1 \right) \cdot l_0 = \left(\frac{19,314}{100} + 1 \right) \cdot 81,6 = 97,3 \text{ mm}$$

$$F_2 = 74,9 \cdot U_F = 74,9 \cdot 62,82 = 4705,2 \text{ N}$$

$$n = \frac{\ln \frac{F_2 \cdot l_2}{F_1 \cdot l_1}}{\ln \frac{l_2}{l_0}} = \frac{\ln \frac{4705,2 \cdot 97,3}{3737,79 \cdot 83,351}}{\ln \frac{97,3}{81,6}} = \frac{\ln 1,469}{\ln \frac{0,175}{0,019}} = \frac{0,384}{2,220} = 0,173$$

У наставку су дати резултати и одређивање „n“ фактора за лим DC04 по другој методи.



Слика 34. DC04-дијаграм затезања до максималне силе - 90° у односу на правац ваљања

$$l_0 = 81,6 \text{ mm}$$

Размера за процентуално издужење:

$$U_A = \frac{20}{92,5} = 0,216 \frac{\%}{1 \text{ mm}}$$

Размера за силу:

$$U_F = \frac{6000}{95,5} = 62,82 \frac{N}{1 \text{ mm}}$$

$$Ag = 21,58 \%$$

$$\frac{Ag}{10} = \frac{21,58}{10} = 2,158$$

$$\frac{2,158}{U_A} = \frac{2,158}{0,216} = 9,99$$

$$A_1 = 2,158 \rightarrow l_1 = \left(\frac{A_1}{100} + 1 \right) \cdot l_0 = \left(\frac{2,158}{100} + 1 \right) \cdot 81,6 = 83,36 \text{ mm}$$

$$F_1 = 53 \cdot U_F = 53 \cdot 62,82 = 3329,46 \text{ N}$$

$$A_2 = 21,58 - 2,158 = 19,422\% \rightarrow l_2 = \left(\frac{A_2}{100} + 1 \right) \cdot l_0 = \left(\frac{19,422}{100} + 1 \right) \cdot 81,6 \\ = 97,448 \text{ mm}$$

$$F_2 = 75 \cdot U_F = 75 \cdot 62,82 = 4711,5 \text{ N}$$

$$n = \frac{\ln \frac{F_2 \cdot l_2}{F_1 \cdot l_1}}{\ln \frac{l_2}{l_0}} = \frac{\ln \frac{4711,5 \cdot 97,448}{3329,46 \cdot 83,36}}{\ln \frac{97,448}{81,6}} = \frac{\ln 1,656}{\ln \frac{0,177}{0,021}} = \frac{0,504}{2,131} = 0,236$$

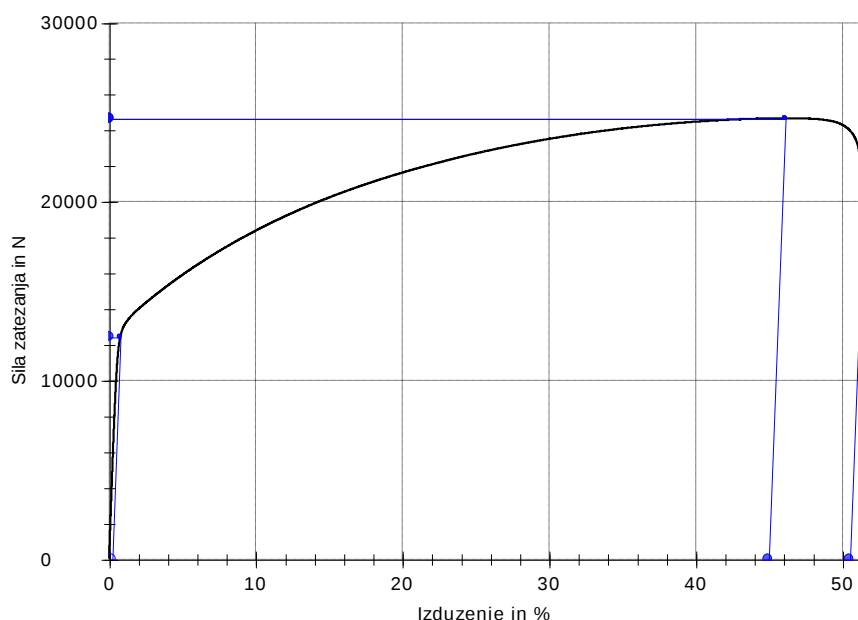
Лим од челика X5CrNiMo17-12-2

Аустенитни нерђајући челик X5CrNiMo17-12-2 (стара ознака Ћ4574) са одличном корозионом отпорношћу. Веома је погодан за хладно пластично обликовање. Има солидну заварљивост. Употребљава се у бродоградњи, пиварској индустрији, петрохемији, фармацеутској и индустрији хране за судове под притиском, цеви, вентиле, измењиваче топлоте, кондензаторе, филтере итд.

Табела 4. Резултати испитивања лима X5CrNi17-12-2

X5CrNiMo17-12-2 дебљина 2 mm						
	L ₀ mm	S ₀ mm ²	R _{p0,2} , MPa	R _m , MPa	Ag %	A %
Мерење до кидања епрувете	120.00	40.70	305.35	605.89	44.98	50.49
Мерење до максималне силе	120.	40.70	310.11	608.76	42.08	

Следе резултати и одређивање „n“ фактора за лим X5CrNi17-12-2 по првој методи.



Слика 35. X5CrNiMo17-12-2 -дијаграм затезања до кидања - 0° у односу на правац ваљања

$$l_0 = 120 \text{ mm}$$

Размера за процентуално издужење:

$$U_A = \frac{50}{132.4} = 0,377 \frac{\%}{1 \text{ mm}}$$

Размера за силу:

$$U_F = \frac{30000}{95.5} = 314.136 \frac{N}{1 \text{ mm}}$$

$$Ag = 45 \%$$

$$\frac{Ag}{10} = \frac{45}{10} = 4,5$$

$$\frac{4.5}{U_A} = \frac{4.5}{0,377} = 11.93 \text{ mm}$$

$$A_1 = 4.5 \rightarrow l_1 = \left(\frac{A_1}{100} + 1 \right) \cdot l_0 = \left(\frac{4.5}{100} + 1 \right) \cdot 120 = 125.4 \text{ mm}$$

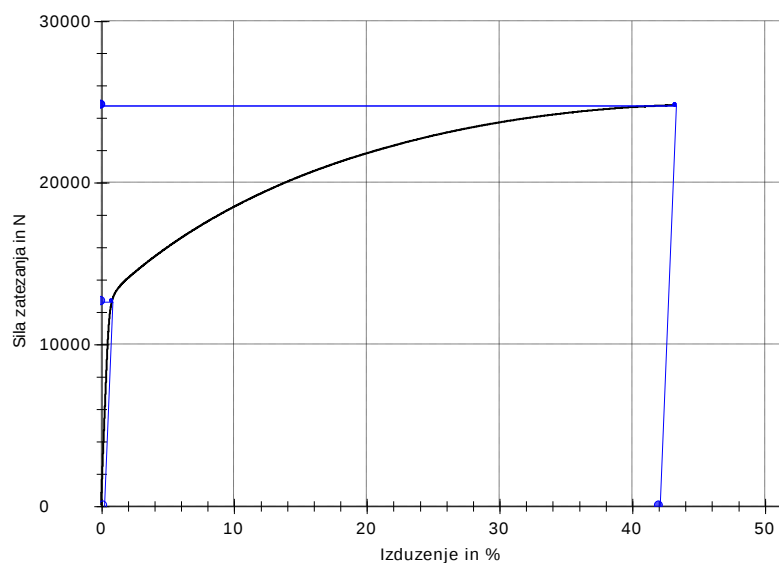
$$F_1 = 39.7 \cdot U_F = 39.7 \cdot 314.136 = 12471.2 \text{ N}$$

$$A_2 = 45 - 4.5 = 40.5 \% \rightarrow l_2 = \left(\frac{40.5}{100} + 1 \right) \cdot l_0 = \left(\frac{40.5}{100} + 1 \right) \cdot 120 = 168.6 \text{ mm}$$

$$F_2 = 78.8 \cdot U_F = 78.8 \cdot 314.136 = 24753.92 \text{ N}$$

$$n = \frac{\ln \frac{F_2 \cdot l_2}{F_1 \cdot l_1}}{\ln \frac{l_2}{l_0} \cdot \ln \frac{l_1}{l_0}} = \frac{\ln \frac{24753.92 \cdot 168.6}{12471.2 \cdot 125.4}}{\ln \frac{168.6}{120} \cdot \ln \frac{125.4}{120}} = \frac{\ln 2.66}{\ln \frac{1.405}{1.045}} = \frac{0.981}{2,04} = 0,480$$

У наставку су дати резултати и одређивање „n“ фактора за лим X5CrNi17-12-2 по другој методи.



Слика 36. X5CrNiMo17-12-2 - дијаграм Дијаграм затезања до макс. силе - θ° у односу на правац ваљања

$$l_0 = 120 \text{ mm}$$

Размера за процентуално издужење:

$$U_A = \frac{50}{132.2} = 0,378 \frac{\%}{1 \text{ mm}}$$

Размера за силу:

$$U_F = \frac{30000}{95.5} = 313,8 \frac{N}{1 \text{ mm}}$$

$$Ag = 42.082 \%$$

$$\frac{Ag}{10} = \frac{42.082}{10} = 4,208$$

$$\frac{4.208}{U_A} = \frac{4.208}{0.378} = 11.13 \text{ mm}$$

$$A_1 = 4.208 \rightarrow l_1 = \left(\frac{A_1}{100} + 1 \right) \cdot l_0 = \left(\frac{4.208}{100} + 1 \right) \cdot 120 = 125.049 \text{ mm}$$

$$F_1 = 40.4 \cdot U_F = 40.4 \cdot 313.8 = 12677.82 \text{ N}$$

$$A_2 = 42.082 - 4.208 = 37.873\% \rightarrow l_2 = \left(\frac{37.873}{100} + 1 \right) \cdot l_0 = \left(\frac{37.873}{100} + 1 \right) \cdot 120 \\ = 165.448 \text{ mm}$$

$$F_2 = 79 \cdot U_F = 79 \cdot 313.8 = 24790.79 \text{ N}$$

$$n = \frac{\ln \frac{F_2 \cdot l_2}{F_1 \cdot l_1}}{\ln \frac{l_2}{l_0}} = \frac{\ln \frac{24790.79 \cdot 165.448}{12677.82 \cdot 125.049}}{\ln \frac{165.448}{120}} = \frac{\ln 2.587}{\ln \frac{1.378}{1.04}} = \frac{0,950}{2,05} = 0,463$$

Лим од челика 51CrV4

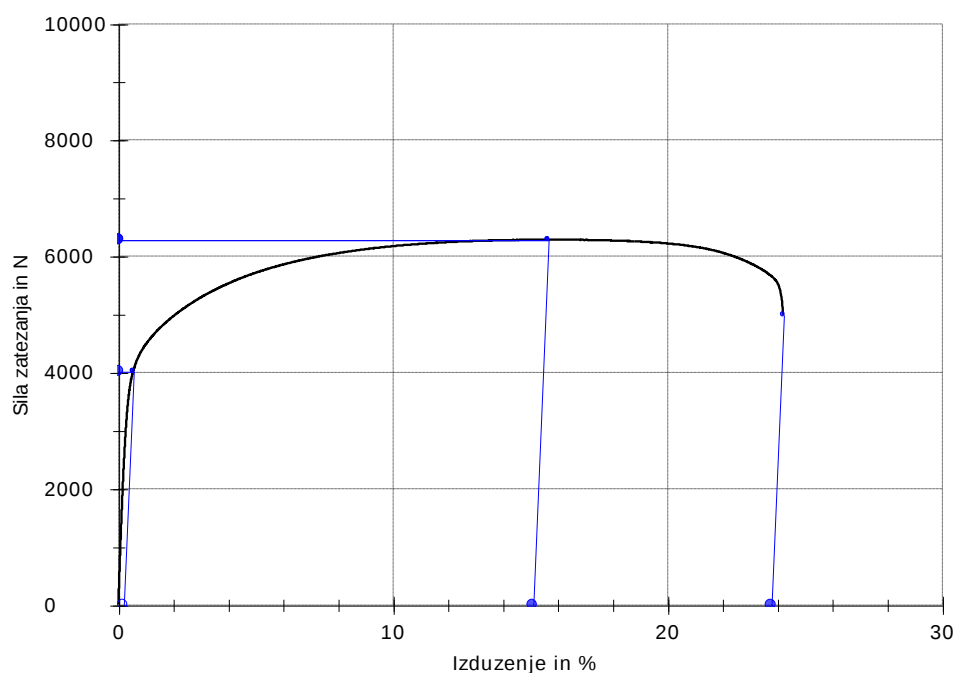
Реч је о опружном челику (стара ознака $\check{C}4830$) који има добра механичка и технолошка својства као и добру прокаљивост. Ванадијум се додаје како би се добила ситнозрнаста структура, побољшала чврстоћа и жилавост, уз високу динамичку чврстоћу. На ниским температурама се понаша боље него нелегирани челици за побољшање због својих својстава жилавости. Употребљава се за статички и динамички оптерећене делове возила, мотора и машина, нарочито за веће пресеке са потребном високом чврстоћом.

Конкретно испитивани узорци лима су вероватно у жареном или нормализованом стању с обзиром на измерене релативно ниске вредности чврстоће. После одговарајућег термичког третмана каљења и отпуштања затезна чврстоћа је обично у опсегу 1100 до 1300 МПа.

Табела 5. Резултати испитивања лима 51CrV4

51CrV4 дебљина 0.61 mm						
	L_0 mm	S_0 mm ²	$R_{p0.2}$ МПа	R_m МПа	Ag %	A %
Мерење до кидања епрувете	120.00	12.32	326.15	510.08	15.10	23.79
Мерење до максималне силе	120.00	12.32	327.16	511.25	14.39	

Следе резултати и одређивање „n“ фактора за лим 51CrV4 по првој методи.



Слика 37. 51CrV4-дијаграм затезања до кидања - 90° у односу на правац ваљања

$$l_0 = 120 \text{ mm}$$

Размера за процентуално издужење:

$$U_A = \frac{30}{136.9} = 0,219 \frac{\%}{1 \text{ mm}}$$

Размера за силу:

$$U_F = \frac{10000}{95.7} = 104.493 \frac{N}{1 \text{ mm}}$$

$$Ag = 15.1 \%$$

$$\frac{Ag}{10} = \frac{15.1}{10} = 1,51$$

$$\frac{1.51}{U_A} = \frac{1.51}{0,219} = 6.89 \text{ mm}$$

$$A_1 = 1.51 \rightarrow l_1 = \left(\frac{A_1}{100} + 1 \right) \cdot l_0 = \left(\frac{1.51}{100} + 1 \right) \cdot 120 = 121.812 \text{ mm}$$

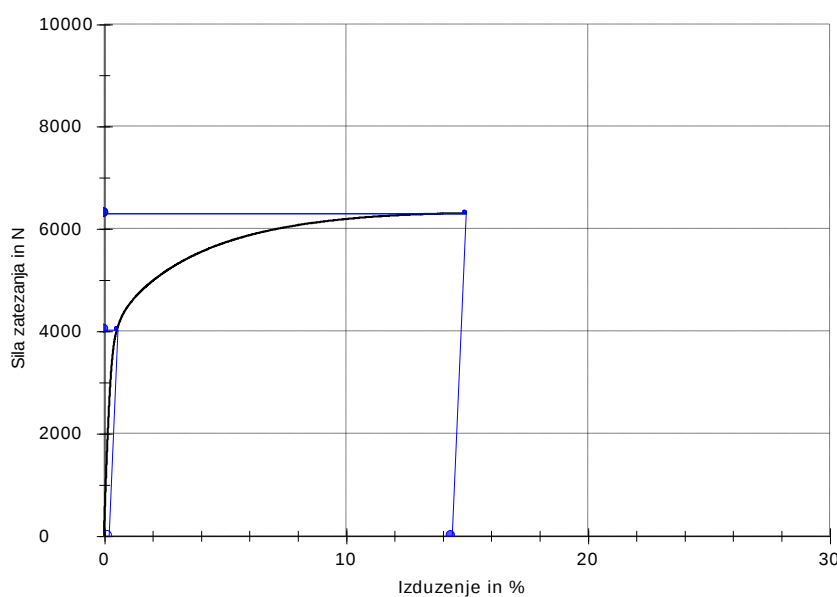
$$F_1 = 38.5 \cdot U_F = 38.5 \cdot 104.493 = 4022.988 \text{ N}$$

$$A_2 = 15.1 - 1.51 = 13.59 \% \rightarrow l_2 = \left(\frac{A_2}{100} + 1 \right) \cdot l_0 = \left(\frac{13.59}{100} + 1 \right) \cdot 120 = 136.308 \text{ mm}$$

$$F_2 = 60.2 \cdot U_F = 60.2 \cdot 104.493 = 6290.491 \text{ N}$$

$$n = \frac{\ln \frac{F_2 \cdot l_2}{F_1 \cdot l_1}}{\ln \frac{l_2}{l_0}} = \frac{\ln \frac{6290.491 \cdot 136.308}{4022.988 \cdot 121.812}}{\ln \frac{136.308}{120}} = \frac{\ln 1.749}{\ln \frac{1.135}{1.015}} = \frac{0.559}{2,140} = 0,261$$

У наставку су дати резултати и одређивање „n“ фактора за лим 51CrV4 по другој методи.



Слика 38. 51CrV4-дијаграм затезања до макс. силе - 90° у односу на правац ваљања

$$l_0 = 120 \text{ mm}$$

Размера за процентуално издужење:

$$U_A = \frac{50}{137.1} = 0.218 \frac{\%}{1 \text{ mm}}$$

Размера за силу:

$$U_F = \frac{10000}{95.6} = 104.6 \frac{N}{1 \text{ mm}}$$

$$Ag = 14.39 \%$$

$$\frac{Ag}{10} = \frac{14.39}{10} = 1.439$$

$$\frac{1.439}{U_A} = \frac{1.439}{0.218} = 6.6 \text{ mm}$$

$$A_1 = 1.439 \rightarrow l_1 = \left(\frac{A_1}{100} + 1 \right) \cdot l_0 = \left(\frac{1.439}{100} + 1 \right) \cdot 120 = 121.726 \text{ mm}$$

$$F_1 = 38.7 \cdot U_F = 38.7 \cdot 104.6 = 4048.117 \text{ N}$$

$$A_2 = 14.39 - 1.439 = 12.951\% \rightarrow l_2 = \left(\frac{A_2}{100} + 1 \right) \cdot l_0 = \left(\frac{12.951}{100} + 1 \right) \cdot 120 \\ = 135.541 \text{ mm}$$

$$F_2 = 60.4 \cdot U_F = 60.4 \cdot 104.6 = 6317.991 \text{ N}$$

$$n = \frac{\ln \frac{F_2 \cdot l_2}{F_1 \cdot l_1}}{\ln \frac{l_2}{l_0}} = \frac{\ln \frac{26317.991 \cdot 135.541}{4048.117 \cdot 121.726}}{\ln \frac{135.541}{120}} = \frac{\ln 1.737}{\ln \frac{1.129}{1.014}} = \frac{0.552}{2.14} = 0.257$$

Лим од легуре AlMg3

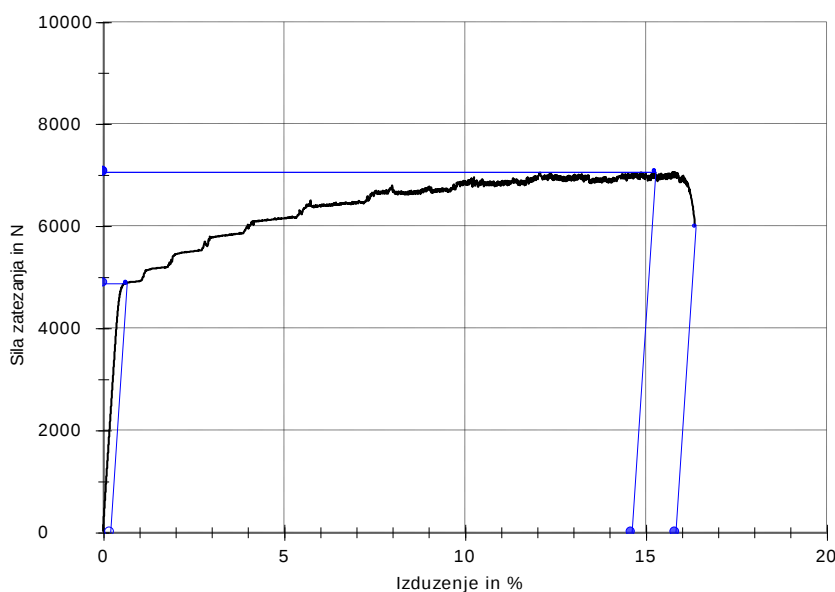
Алуминијумске легуре система Al-Mg одликују се задовољавајућом чврстоћом, повољном пластичношћу и корозионом постојаношћу. То су легуре из тзв. групе 5000. Ознака по европском стандарду је EN AW 5754. Могу се добити у више стања, а најчешће је стање H22 (тзв. 1/4 тврдо) у коме су и конкретно испитивани узорци.

Магнезијум, као главни легирајући елемент у легурама система је ограничено растворљив у алуминијуму, пре чему се растворљивост мења са променом температуре. Присуство примеса силицијума, гвожђа, бакра, мангана, хрома, цинка и титана одражава се на смањење пластичности и корозионе постојаности легуре.

Табела 6. Резултати испитивања лима AlMg3

AlMg3 дебљина 1.5 mm						
	L ₀ mm	S ₀ mm ²	R _{p0,2} MPa	R _m MPa	Ag %	A %
Мерење до кидања епрувете	120.00	30.30	161.14	232.93	14.61	15.82
Мерење до максималне силе	120.00	30.30	158.90	230.38	13.11	

Следе резултати и одређивање „n“ фактора за лим AlMg3 по првој методи.



Слика 39. AlMg3-дијаграм затезања до кидања - 0° у односу на правац ваљања

$$l_0 = 120 \text{ mm}$$

Размера за процентуално издужење:

$$U_A = \frac{20}{137.2} = 0,145 \frac{\%}{1 \text{ mm}}$$

Размера за силу:

$$U_F = \frac{10000}{95.8} = 104.384 \frac{N}{1 \text{ mm}}$$

$$Ag = 14.61 \%$$

$$\frac{Ag}{10} = \frac{14.61}{10} = 1,46$$

$$\frac{1.46}{U_A} = \frac{1.46}{0,145} = 10.06 \text{ mm}$$

$$A_1 = 1.46 \rightarrow l_1 = \left(\frac{A_1}{100} + 1 \right) \cdot l_0 = \left(\frac{1.46}{100} + 1 \right) \cdot 120 = 121.753 \text{ mm}$$

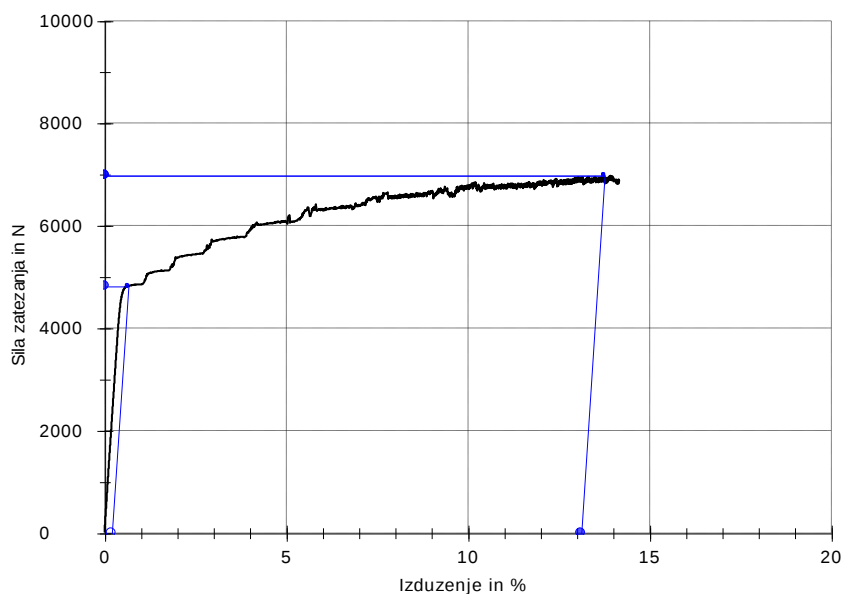
$$F_1 = 46.8 \cdot U_F = 46.8 \cdot 104.384 = 4885.177 \text{ N}$$

$$A_2 = 14.61 - 1.46 = 13.14 \% \rightarrow l_2 = \left(\frac{A_2}{100} + 1 \right) \cdot l_0 = \left(\frac{13.14}{100} + 1 \right) \cdot 120 = 135.778 \text{ mm}$$

$$F_2 = 67.8 \cdot U_F = 67.8 \cdot 104.384 = 7077.244 \text{ N}$$

$$n = \frac{\ln \frac{F_2 \cdot l_2}{F_1 \cdot l_1}}{\ln \frac{l_2}{l_1}} = \frac{\ln \frac{7077.244 \cdot 135.778}{4885.177 \cdot 121.753}}{\ln \frac{135.778}{121.753}} = \frac{\ln 1.615}{\ln \frac{1.131}{1.014}} = \frac{0.479}{2,142} = 0,223$$

У наставку су дати резултати и одређивање „n“ фактора за лим AlMg3 по другој методи.



Слика 40. AlMg3-дијаграм затезања до макс. силе - 0° у односу на правац ваљања

$$l_0 = 120 \text{ mm}$$

Размера за процентуално издужење:

$$U_A = \frac{20}{137} = 0.145 \frac{\%}{1 \text{ mm}}$$

Размера за силу:

$$U_F = \frac{10000}{96} = 104.166 \frac{N}{1 \text{ mm}}$$

$$Ag = 13.11 \%$$

$$\frac{Ag}{10} = \frac{13.11}{10} = 1.311$$

$$\frac{1.311}{U_A} = \frac{1.311}{0.145} = 9.04 \text{ mm}$$

$$A_1 = 1.311 \rightarrow l_1 = \left(\frac{A_1}{100} + 1 \right) \cdot l_0 = \left(\frac{1.311}{100} + 1 \right) \cdot 120 = 121.573 \text{ mm}$$

$$F_1 = 46.1 \cdot U_F = 46.1 \cdot 104.166 = 4802.083 \text{ N}$$

$$A_2 = 13.11 - 1.311 = 11.799\% \rightarrow l_2 = \left(\frac{A_2}{100} + 1 \right) \cdot l_0 = \left(\frac{11.799}{100} + 1 \right) \cdot 120 \\ = 134.158 \text{ mm}$$

$$F_2 = 67.2 \cdot U_F = 67.2 \cdot 104.166 = 7000 \text{ N}$$

$$n = \frac{\ln \frac{F_2 \cdot l_2}{F_1 \cdot l_1}}{\ln \frac{l_2}{l_0}} = \frac{\ln \frac{7000 \cdot 134.158}{4802.083 \cdot 121.573}}{\ln \frac{134.158}{120}} = \frac{\ln 1.608}{\ln \frac{1.117}{1.013}} = \frac{0.475}{2.147} = 0.221$$

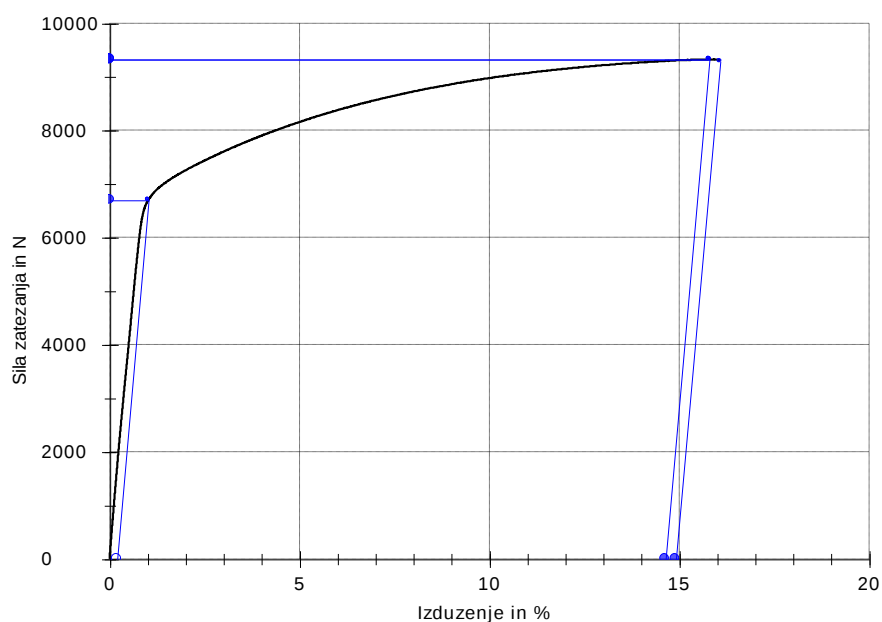
Лим од легуре AlCu4Mg1Mn

Ова легура алуминијума са три главна елемента (бакром, магнезијумом и манганом) спада у групу дурала. Уз све остале особине алуминијумских легура, има изузетна својства чврстоће због чега има велику примену у ваздухопловној индустрији, али и за многе друге намене у војној и другим индустријама. На повећање чврстоће највише утиче магнезијум, као и одговарајуће стање. Типично се користи за структурне компоненте које су изложене статичким и динамичким напрезањима. Легура је позната и по ознаци 2024, а конкретни узорци су 2024-4 у стању Т351. У одговарајућем "меканом" стању може се пластично обликовати, а затим термичким третманом довести до жељене чврстоће.

Табела 7. Резултати испитивања лима AlCu4Mg1Mn

AlCu4Mg1Mn дебљина 1mm						
	L ₀ mm	S ₀ mm ²	R _{p0,2} , MPa	R _m , MPa	Ag %	A %
Мерење до кидања епрувете	120.00	20.05	333.98	465.06	14.64	14.93
Мерење до максималне силе	120.00	20.05	331.79	459.99	13.04	

Следе резултати и одређивање „n“ фактора за лим AlCu4Mg1Mn по првој методи.



Слика 41. AlCu4Mg1Mn-дијаграм затезања до кидања - 0° у односу на правац ваљања

$$l_0 = 120 \text{ mm}$$

Размера за процентуално издужење:

$$U_A = \frac{20}{137.1} = 0.145 \frac{\%}{1 \text{ mm}}$$

Размера за силу:

$$U_F = \frac{10000}{96.2} = 103.95 \frac{N}{1 \text{ mm}}$$

$$Ag = 14.64 \%$$

$$\frac{Ag}{10} = \frac{14.64}{10} = 1.464$$

$$\frac{1.464}{U_A} = \frac{1.464}{0.145} = 10.09 \text{ mm}$$

$$A_1 = 1.464 \rightarrow l_1 = \left(\frac{A_1}{100} + 1 \right) \cdot l_0 = \left(\frac{1.464}{100} + 1 \right) \cdot 120 = 121.756 \text{ mm}$$

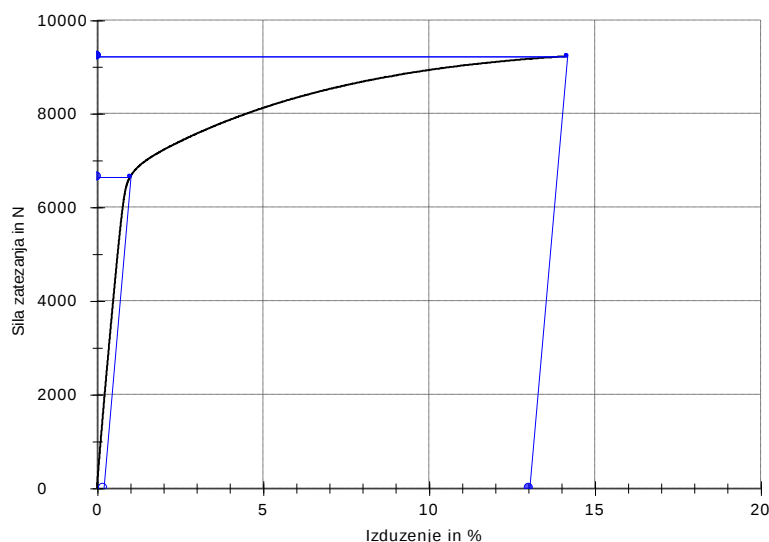
$$F_1 = 64.5 \cdot U_F = 64.5 \cdot 103.95 = 6704.781 \text{ N}$$

$$A_2 = 14.64 - 1.464 = 13.176\% \rightarrow l_2 = \left(\frac{A_2}{100} + 1 \right) \cdot l_0 = \left(\frac{13.176}{100} + 1 \right) \cdot 120 = 135.811 \text{ mm}$$

$$F_2 = 89.7 \cdot U_F = 89.7 \cdot 103.95 = 9324.324 \text{ N}$$

$$n = \frac{\ln \frac{F_2 \cdot l_2}{F_1 \cdot l_1}}{\ln \frac{l_2}{l_0}} = \frac{\ln \frac{9324.324 \cdot 135.811}{6704.781 \cdot 121.756}}{\ln \frac{135.811}{120}} = \frac{\ln 1.551}{\ln \frac{1.131}{1.014}} = \frac{0.439}{2.141} = 0.204$$

У наставку су дати резултати и одређивање „n“ фактора за лим AlCu4Mg1Mn по другој методи.



Слика 42. AlCu4Mg1Mn-дијаграм затезања до макс. силе - 0° у односу на правац ваљања

$$l_0 = 120 \text{ mm}$$

Размера за процентуално издужење:

$$U_A = \frac{20}{137.1} = 0.145 \frac{\%}{1 \text{ mm}}$$

Размера за силу:

$$U_F = \frac{10000}{96} = 104,166 \frac{N}{1 \text{ mm}}$$

$$Ag = 13 \%$$

$$\frac{Ag}{10} = \frac{13}{10} = 1.3$$

$$\frac{1.3}{U_A} = \frac{1.3}{0.145} = 8.9 \text{ mm}$$

$$A_1 = 1.3 \rightarrow l_1 = \left(\frac{A_1}{100} + 1 \right) \cdot l_0 = \left(\frac{1.3}{100} + 1 \right) \cdot 120 = 121.56 \text{ mm}$$

$$F_1 = 64.2 \cdot U_F = 64.2 \cdot 104.166 = 6687.5 \text{ N}$$

$$A_2 = 13 - 1.3 = 11.7\% \rightarrow l_2 = \left(\frac{A_2}{100} + 1 \right) \cdot l_0 = \left(\frac{11.7}{100} + 1 \right) \cdot 120 = 134.04 \text{ mm}$$

$$F_2 = 88.8 \cdot U_F = 88.8 \cdot 104.166 = 9250 \text{ N}$$

$$n = \frac{\ln \frac{F_2 \cdot l_2}{F_1 \cdot l_1}}{\ln \frac{l_2}{l_0}} = \frac{\ln \frac{9250 \cdot 134.04}{6687.5 \cdot 121.56}}{\ln \frac{134.04}{120}} = \frac{\ln 1.25}{\ln \frac{1.117}{1.013}} = \frac{0.223}{0.101} = 2.21$$

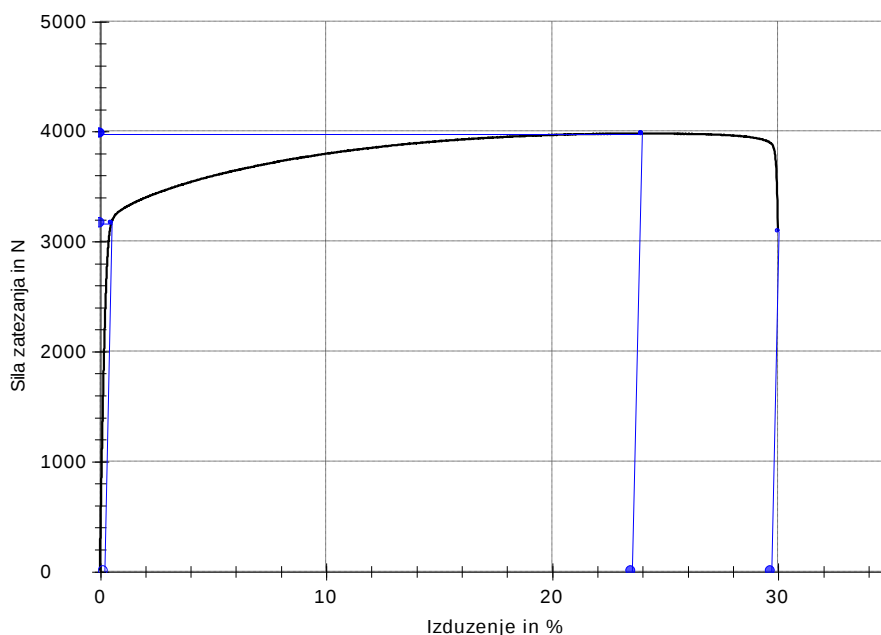
Лим од бакра (Cu-DHP)

Ови узорци су израђени од чистог дезоксидисаног бакра са заосталим процентом фосфора до 0,04%. Материјал се одликује високом пластичношћу и добром способношћу спајања, уз нешто смањену проводљивост због садржаја фосфора. Користи се у електроиндустрији, индустрији цеви, кровних покривача, процесној индустрији итд. Механичке карактеристике веома зависе од стања, које је овде R250.

Табела 8. Резултати испитивања лима од бакра

Cu-DHP дебљина 0.8 mm						
	L ₀ mm	S ₀ mm ²	R _{p0,2} , MPa	R _m , MPa	Ag %	A %
Мерење до кидања епрувете	120.00	16.04	197.22	248.03	23.56	29.71
Мерење до максималне силе	120.00	16.04	194.76	245	22.86	

Следе резултати и одређивање „n“ фактора за лим Cu-DHP по првој методи.



Слика 43. Cu-DHP-дијаграм затезања до кидања - 0° у односу на правац ваљања

$$l_0 = 120 \text{ mm}$$

Размера за процентуално издужење:

$$U_A = \frac{30}{76,6} = 0,254 \frac{\%}{1 \text{ mm}}$$

Размера за силу:

$$U_F = \frac{4000}{76,5} = 52,287 \frac{N}{1 \text{ mm}}$$

$$Ag = 23,56 \%$$

$$\frac{Ag}{10} = \frac{23,56}{10} = 2,356$$

$$\frac{2,356}{U_A} = \frac{2,356}{0,254} = 9,275 \text{ mm}$$

$$A_1 = 2,356 \rightarrow l_1 = \left(\frac{A_1}{100} + 1 \right) \cdot l_0 = \left(\frac{2,356}{100} + 1 \right) \cdot 120 = 122,827 \text{ mm}$$

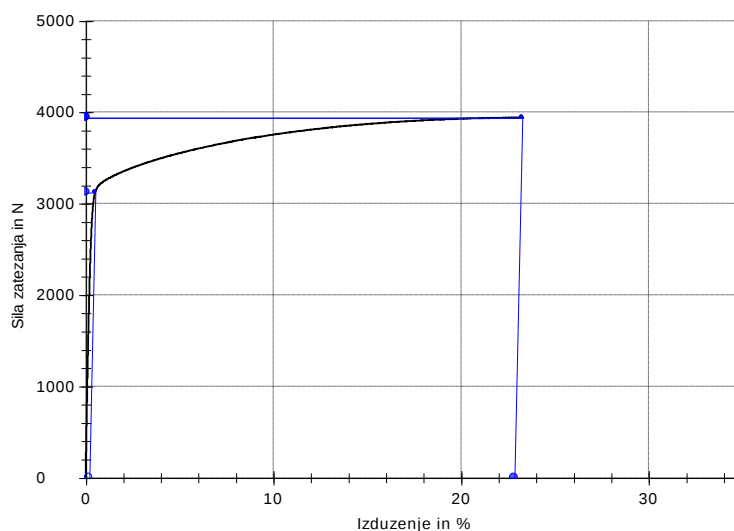
$$F_1 = 60,5 \cdot U_F = 60,5 \cdot 52,287 = 3163,39 \text{ N}$$

$$A_2 = 23,56 - 2,356 = 21,20 \% \rightarrow l_2 = \left(\frac{A_2}{100} + 1 \right) \cdot l_0 = \left(\frac{21,20}{100} + 1 \right) \cdot 120 = 145,444 \text{ mm}$$

$$F_2 = 76,4 \cdot U_F = 76,4 \cdot 52,28 = 3994,771 \text{ N}$$

$$n = \frac{\ln \frac{F_2 \cdot l_2}{F_1 \cdot l_1}}{\ln \frac{l_2}{l_0}} = \frac{\ln \frac{3994,771 \cdot 145,444}{3163,39 \cdot 122,827}}{\ln \frac{145,444}{120}} = \frac{\ln 1,49}{\ln \frac{1,21}{1,02}} = \frac{0,402}{2,11} = 0,190$$

У наставку су дати резултати и одређивање „n“ фактора за лим Cu-DHP по другој методи.



Слика 44. Cu-DHP-дијаграм затезања до макс. силе - 0° у односу на правац ваљања

$$l_0 = 120 \text{ mm}$$

Размера за процентуално издужење:

$$U_A = \frac{30}{119,1} = 0,251 \frac{\%}{1 \text{ mm}}$$

Размера за силу:

$$U_F = \frac{4000}{76,8} = 52,08 \frac{N}{1 \text{ mm}}$$

$$Ag = 22,86 \%$$

$$\frac{Ag}{10} = \frac{22,86}{10} = 2,286$$

$$\frac{22,86}{U_A} = \frac{22,86}{0,251} = 2,286 \text{ mm}$$

$$A_1 = 2,286 \rightarrow l_1 = \left(\frac{A_1}{100} + 1 \right) \cdot l_0 = \left(\frac{2,286}{100} + 1 \right) \cdot 120 = 122,743 \text{ mm}$$

$$F_1 = 60 \cdot Uf = 60 \cdot 52,08 = 3125 \text{ N}$$

$$A_2 = 22,86 - 2,286 = 20,57\% \rightarrow l_2 = \left(\frac{A_2}{100} + 1 \right) \cdot l_0 = \left(\frac{20,57}{100} + 1 \right) \cdot 120 \\ = 144,688 \text{ mm}$$

$$F_2 = 7U_F = 75,5 \cdot 52,08 = 3932,291 \text{ N}$$

$$n = \frac{\ln \frac{F_2 \cdot l_2}{F_1 \cdot l_1}}{\ln \frac{l_2}{l_0}} = \frac{\ln \frac{3932,291 \cdot 144,688}{3125 \cdot 122,743}}{\ln \frac{144,688}{120}} = \frac{\ln 1,48}{\ln \frac{1,205}{1,022}} = \frac{0,394}{2,113} = 0,1$$

4.3 Примена методе затезања двостепене епрувете – Резултати

Следе резултатати „н“ фактора степенасте епрувете - трећа метода за лим **CuZn37**

$$l_{01} = 80 \text{ mm} ; \quad l_{02} = 80 \text{ mm}$$

$$b_{01} = 20,02 \text{ mm} ; \quad b_{02} = 22 \text{ mm}$$

Табела 9. Приказ измерених параметара епрувете

Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3
$l_1 = 89,2 \text{ mm}$	$l_1 = 98,3 \text{ mm}$	$l_1 = 108 \text{ mm}$
$l_2 = 87 \text{ mm}$	$l_2 = 93,6 \text{ mm}$	$l_2 = 99,6 \text{ mm}$

$$n_1 = \frac{\ln \frac{b_{02} \cdot l_{02} \cdot l_1}{b_{01} \cdot l_{01} \cdot l_2}}{\ln \frac{l_1}{l_{01}} \cdot \ln \frac{l_2}{l_{02}}} = \frac{\ln \frac{22 \cdot 80 \cdot 89,2}{20,02 \cdot 80 \cdot 87}}{\ln \frac{89,2}{80} \cdot \ln \frac{87}{80}} = \frac{\ln 1,126}{\ln \frac{0,108}{0,083}} = \frac{0,119}{0,263} = 0,452$$

$$n_2 = \frac{\ln \frac{b_{02} \cdot l_{02} \cdot l_1}{b_{01} \cdot l_{01} \cdot l_2}}{\ln \frac{l_1}{l_{01}} \cdot \ln \frac{l_2}{l_{02}}} = \frac{\ln \frac{22 \cdot 80 \cdot 98,3}{20,02 \cdot 80 \cdot 93,6}}{\ln \frac{98,3}{80} \cdot \ln \frac{93,6}{80}} = \frac{\ln 1,153}{\ln \frac{0,205}{0,157}} = \frac{0,142}{0,266} = 0,535$$

$$n_3 = \frac{\ln \frac{b_{02} \cdot l_{02} \cdot l_1}{b_{01} \cdot l_{01} \cdot l_2}}{\ln \frac{l_1}{l_{01}} \cdot \ln \frac{l_2}{l_{02}}} = \frac{\ln \frac{22 \cdot 80 \cdot 108}{20,02 \cdot 80 \cdot 99,6}}{\ln \frac{108}{80} \cdot \ln \frac{99,6}{80}} = \frac{\ln 1,191}{\ln \frac{0,300}{0,219}} = \frac{0,175}{0,314} = 0,558$$



Слика 45. Епрувете од легуре CuZn37 пре и после експеримента

Следе резултатати „n“ фактора степенасте епрувете - трећа метода за лим X5CrNi18-10

$$l_{01} = 80 \text{ mm}; \quad l_{02} = 80 \text{ mm}$$

$$b_{01} = 20,27 \text{ mm}; \quad b_{02} = 22,28 \text{ mm}$$

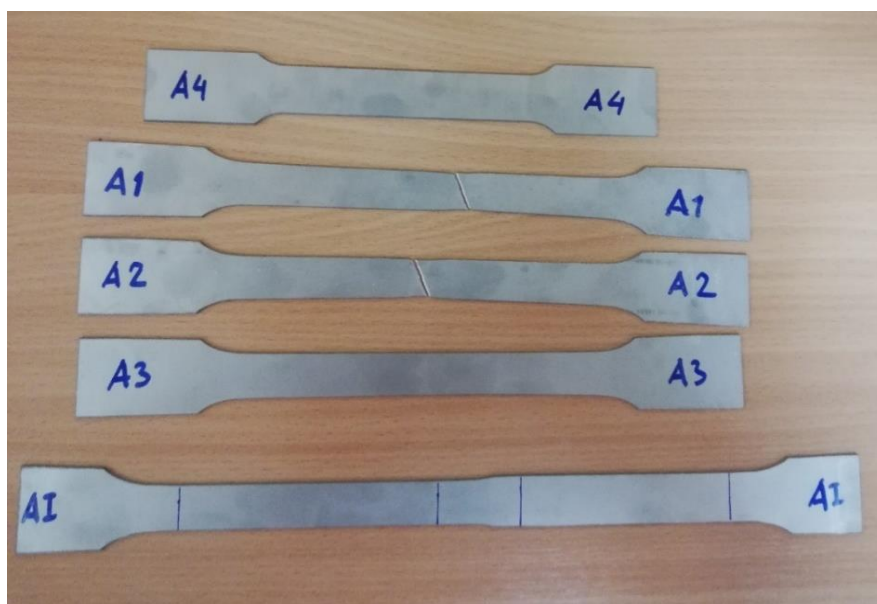
Табела 10. Приказ измерених параметара епрувете

Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3
$l_1 = 89,1 \text{ mm}$	$l_1 = 98,8 \text{ mm}$	$l_1 = 115,8 \text{ mm}$
$l_2 = 86,5 \text{ mm}$	$l_2 = 91,7 \text{ mm}$	$l_2 = 100,5 \text{ mm}$

$$n_1 = \frac{\ln \frac{b_{02} \cdot l_{02} \cdot l_1}{b_{01} \cdot l_{01} \cdot l_2}}{\ln \frac{l_1}{l_{01}}} = \frac{\ln \frac{22,28 \cdot 80 \cdot 89,1}{20,27 \cdot 80 \cdot 86,5}}{\ln \frac{89,1}{80}} = \frac{\ln 1,132}{\ln \frac{0,107}{0,078}} = \frac{0,124}{0,316} = 0,392$$

$$n_2 = \frac{\ln \frac{b_{02} \cdot l_{02} \cdot l_1}{b_{01} \cdot l_{01} \cdot l_2}}{\ln \frac{l_1}{l_{01}}} = \frac{\ln \frac{22,28 \cdot 80 \cdot 98,8}{20,27 \cdot 80 \cdot 91,7}}{\ln \frac{98,8}{80}} = \frac{\ln 1,184}{\ln \frac{0,211}{0,136}} = \frac{0,169}{0,439} = 0,387$$

$$n_3 = \frac{\ln \frac{b_{02} \cdot l_{02} \cdot l_1}{b_{01} \cdot l_{01} \cdot l_2}}{\ln \frac{l_1}{l_{01}}} = \frac{\ln \frac{22,28 \cdot 80 \cdot 115,8}{20,27 \cdot 80 \cdot 100,5}}{\ln \frac{115,8}{80}} = \frac{\ln 1,266}{\ln \frac{0,369}{0,228}} = \frac{0,236}{0,483} = 0,488$$



Слика 46. Епрувете од челика X5CrNi18-10 пре и после експеримента

Трећа метода за епрувете од челика DC04 нису испитиване за овај експеримент.

Следе резултати „n“ фактора степенасте епрувете - трећа метода за лим X5CrNi17-12-2

$$l_{01} = 80.2 \text{ mm}; \quad l_{02} = 80 \text{ mm}$$

$$b_{01} = 19.03 \text{ mm}; \quad b_{02} = 21.08 \text{ mm}$$

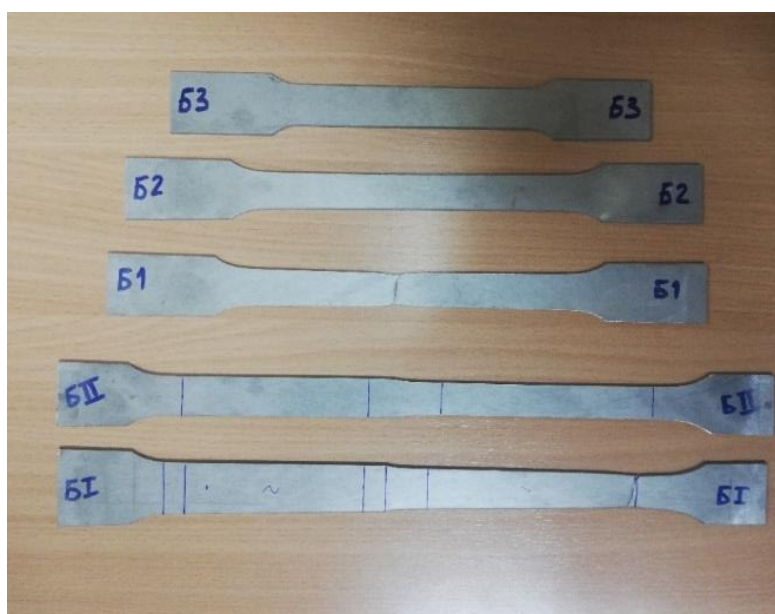
Табела 11. Приказ измерених параметара епрувете

Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3
$l_1 = 84.3 \text{ mm}$	$l_1 = 87.4 \text{ mm}$	$l_1 = 111.05 \text{ mm}$
$l_2 = 82.3 \text{ mm}$	$l_2 = 85.08 \text{ mm}$	$l_2 = 95 \text{ mm}$

$$n_1 = \frac{\ln \frac{b_{02} \cdot l_{02} \cdot l_1}{b_{01} \cdot l_{01} \cdot l_2}}{\ln \frac{l_1}{l_2}} = \frac{\ln \frac{21.08 \cdot 80 \cdot 84.3}{19.03 \cdot 80.2 \cdot 82.3}}{\ln \frac{84.3}{82.3}} = \frac{\ln 1.131}{\ln \frac{0.049}{0.028}} = \frac{0.123}{0.564} = 0.219$$

$$n_2 = \frac{\ln \frac{b_{02} \cdot l_{02} \cdot l_1}{b_{01} \cdot l_{01} \cdot l_2}}{\ln \frac{l_1}{l_2}} = \frac{\ln \frac{21.08 \cdot 80 \cdot 87.3}{19.03 \cdot 80.2 \cdot 85.08}}{\ln \frac{87.4}{85.08}} = \frac{\ln 1.133}{\ln \frac{0.085}{0.061}} = \frac{0.125}{0.333} = 0.376$$

$$n_3 = \frac{\ln \frac{b_{02} \cdot l_{02} \cdot l_1}{b_{01} \cdot l_{01} \cdot l_2}}{\ln \frac{l_1}{l_2}} = \frac{\ln \frac{21.08 \cdot 80 \cdot 111.05}{19.03 \cdot 80.2 \cdot 95}}{\ln \frac{111.05}{80.2}} = \frac{\ln 1.291}{\ln \frac{0.325}{0.171}} = \frac{0.255}{0.638} = 0.400$$



Слика 47. Епрувете од челика X5CrNi17-12-2 пре и после експеримента

Следе резултатати „n“ фактора степенасте епрувете - трећа метода за лим **51CrV4**

$$l_{01} = 79.6 \text{ mm} ; l_{02} = 79.6 \text{ mm}$$

$$b_{01} = 19.77 \text{ mm} ; b_{02} = 21.67 \text{ mm}$$

Табела 12. Приказ измерених параметара епрувете

Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3
$l_1 = 85 \text{ mm}$	$l_1 = 89.4 \text{ mm}$	$l_1 = 97 \text{ mm}$
$l_2 = 82.3 \text{ mm}$	$l_2 = 83.9 \text{ mm}$	$l_2 = 84.65 \text{ mm}$

$$n_1 = \frac{\ln \frac{b_{02} \cdot l_{02} \cdot l_1}{b_{01} \cdot l_{01} \cdot l_2}}{\ln \frac{l_1}{l_{01}} \cdot \ln \frac{l_2}{l_{02}}} = \frac{\ln \frac{21.67 \cdot 79.6 \cdot 85}{19.77 \cdot 79.6 \cdot 82.3}}{\ln \frac{85}{79.6} \cdot \ln \frac{82.3}{79.6}} = \frac{\ln 1.132}{\ln \frac{0.065}{0.033}} = \frac{0.124}{0.676} = 0.183$$

$$n_2 = \frac{\ln \frac{b_{02} \cdot l_{02} \cdot l_1}{b_{01} \cdot l_{01} \cdot l_2}}{\ln \frac{l_1}{l_{01}} \cdot \ln \frac{l_2}{l_{02}}} = \frac{\ln \frac{21.67 \cdot 79.6 \cdot 89.4}{19.77 \cdot 79.6 \cdot 83.9}}{\ln \frac{89.4}{79.6} \cdot \ln \frac{83.9}{79.6}} = \frac{\ln 1.167}{\ln \frac{0.116}{0.052}} = \frac{0.155}{0.791} = 0.196$$

$$n_3 = \frac{\ln \frac{b_{02} \cdot l_{02} \cdot l_1}{b_{01} \cdot l_{01} \cdot l_2}}{\ln \frac{l_1}{l_{01}} \cdot \ln \frac{l_2}{l_{02}}} = \frac{\ln \frac{21.67 \cdot 79.6 \cdot 97}{19.77 \cdot 79.6 \cdot 84.65}}{\ln \frac{97}{79.6} \cdot \ln \frac{84.65}{79.6}} = \frac{\ln 1.256}{\ln \frac{0.197}{0.061}} = \frac{0.227}{1.167} = 0.195$$



Слика 48. Епрувете од челика 51CrV4 пре и после експеримента

Следе резултатати „n“ фактора степенасте епрувете - трећа метода за лим **AlMg3**

$$l_{01} = 80 \text{ mm} ; l_{02} = 80 \text{ mm}$$

$$b_{01} = 20.04 \text{ mm} ; b_{02} = 22.03 \text{ mm}$$

Табела 13. Приказ измерених параметара епрувете

Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3
$l_1 = 83.5 \text{ mm}$	$l_1 = 86.8 \text{ mm}$	$l_1 = 89.5 \text{ mm}$
$l_2 = 81.3 \text{ mm}$	$l_2 = 82.2 \text{ mm}$	$l_2 = 83.3 \text{ mm}$

$$n_1 = \frac{\ln \frac{b_{02} \cdot l_{02} \cdot l_1}{b_{01} \cdot l_{01} \cdot l_2}}{\ln \frac{l_1}{l_{01}} \cdot \ln \frac{l_2}{l_{02}}} = \frac{\ln \frac{22.03 \cdot 80 \cdot 83.5}{20.04 \cdot 80 \cdot 81.3}}{\ln \frac{83.5}{80} \cdot \ln \frac{81.3}{80}} = \frac{\ln 1.126}{\ln \frac{0.042}{0.018}} = \frac{0.118}{0.835} = 0.142$$

$$n_2 = \frac{\ln \frac{b_{02} \cdot l_{02} \cdot l_1}{b_{01} \cdot l_{01} \cdot l_2}}{\ln \frac{l_1}{l_{01}} \cdot \ln \frac{l_2}{l_{02}}} = \frac{\ln \frac{22.03 \cdot 80 \cdot 86.8}{20.04 \cdot 80 \cdot 82.2}}{\ln \frac{86.8}{80} \cdot \ln \frac{82.2}{80}} = \frac{\ln 1.160}{\ln \frac{0.081}{0.027}} = \frac{0.149}{1.100} = 0.135$$

$$n_3 = \frac{\ln \frac{b_{02} \cdot l_{02} \cdot l_1}{b_{01} \cdot l_{01} \cdot l_2}}{\ln \frac{l_1}{l_{01}} \cdot \ln \frac{l_2}{l_{02}}} = \frac{\ln \frac{22.03 \cdot 80 \cdot 89.5}{20.04 \cdot 80 \cdot 83.3}}{\ln \frac{89.5}{80} \cdot \ln \frac{83.3}{80}} = \frac{\ln 1.181}{\ln \frac{0.112}{0.040}} = \frac{0.166}{1.021} = 0.163$$



Слика 49. Епрувете од легуре **AlMg3** пре и после експеримента

Следе резултатати „n“ фактора степенасте епрувете - трећа метода за лим **ALCu4Mg1Mn**

$$l_{01} = 80 \text{ mm} ; l_{02} = 80 \text{ mm}$$

$$b_{01} = 20.11 \text{ mm} ; b_{02} = 22.15 \text{ mm}$$

Табела 14. Приказ измерених параметара епрувете

Фаза 1	Фаза 2
$l_1 = 84.9 \text{ mm}$	$l_1 = 90 \text{ mm}$
$l_2 = 81.8 \text{ mm}$	$l_2 = 83 \text{ mm}$

$$n_1 = \frac{\ln \frac{b_{02} \cdot l_{02} \cdot l_1}{b_{01} \cdot l_{01} \cdot l_2}}{\ln \frac{l_1}{l_{01}} \cdot \ln \frac{l_2}{l_{02}}} = \frac{\ln \frac{22.15 \cdot 80 \cdot 84.9}{20.11 \cdot 80 \cdot 81.8}}{\ln \frac{84.9}{80} \cdot \ln \frac{81.8}{80}} = \frac{\ln 1.143}{\ln \frac{0.059}{0.022}} = \frac{0.133}{0.982} = 0.136$$

$$n_2 = \frac{\ln \frac{b_{02} \cdot l_{02} \cdot l_1}{b_{01} \cdot l_{01} \cdot l_2}}{\ln \frac{l_1}{l_{01}} \cdot \ln \frac{l_2}{l_{02}}} = \frac{\ln \frac{22.15 \cdot 80 \cdot 90}{20.11 \cdot 80 \cdot 83}}{\ln \frac{90}{80} \cdot \ln \frac{83}{80}} = \frac{\ln 1.194}{\ln \frac{0.117}{0.036}} = \frac{0.177}{1.162} = 0.152$$



Слика 50. Епрувете од легуре AlCu4Mg1M пре и после експеримента

Следе резултатати „n“ фактора степенасте епрувете - трећа метода за лим **Cu-DHP**

$$l_{01} = 80 \text{ mm} ; l_{02} = 80,5 \text{ mm}$$

$$b_{01} = 20,15 \text{ mm} ; b_{02} = 22,11 \text{ mm}$$

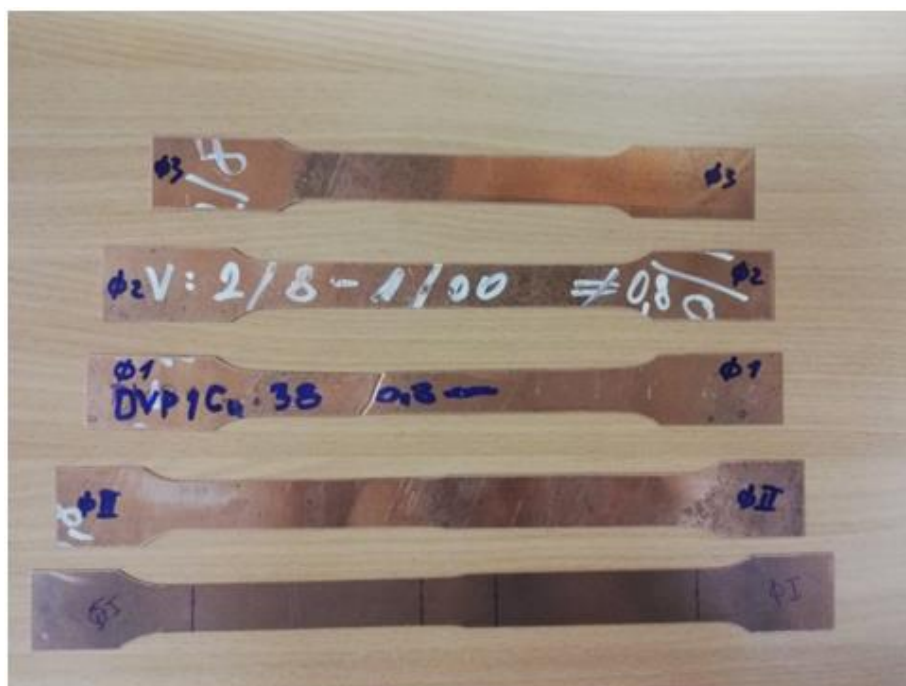
Табела 15. Приказ измерених параметара епрувете од бакра

Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3
$l_1 = 85 \text{ mm}$	$l_1 = 88,9 \text{ mm}$	$l_1 = 92,9 \text{ mm}$
$l_2 = 81,6 \text{ mm}$	$l_2 = 83 \text{ mm}$	$l_2 = 84 \text{ mm}$

$$n_1 = \frac{\ln \frac{b_{02} \cdot l_{02} \cdot l_1}{b_{01} \cdot l_{01} \cdot l_2}}{\ln \frac{l_1}{l_{01}} \cdot \ln \frac{l_2}{l_{02}}} = \frac{\ln \frac{22,11 \cdot 80,5 \cdot 85}{20,15 \cdot 80 \cdot 81,6}}{\ln \frac{85}{80} \cdot \ln \frac{81,6}{80,5}} = \frac{\ln 1,150}{\ln \frac{0,060}{0,013}} = \frac{0,139}{1,496} = 0,093$$

$$n_2 = \frac{\ln \frac{b_{02} \cdot l_{02} \cdot l_1}{b_{01} \cdot l_{01} \cdot l_2}}{\ln \frac{l_1}{l_{01}} \cdot \ln \frac{l_2}{l_{02}}} = \frac{\ln \frac{22,11 \cdot 80,5 \cdot 88,9}{20,15 \cdot 80 \cdot 83}}{\ln \frac{88,9}{80} \cdot \ln \frac{83}{80,5}} = \frac{\ln 1202}{\ln \frac{0,105}{0,030}} = \frac{0,184}{1,238} = 0,149$$

$$n_3 = \frac{\ln \frac{b_{02} \cdot l_{02} \cdot l_1}{b_{01} \cdot l_{01} \cdot l_2}}{\ln \frac{l_1}{l_{01}} \cdot \ln \frac{l_2}{l_{02}}} = \frac{\ln \frac{22 \cdot 80 \cdot 92,9}{20,02 \cdot 80 \cdot 84}}{\ln \frac{92,9}{80} \cdot \ln \frac{84}{80}} = \frac{\ln 1,221}{\ln \frac{0,149}{0,042}} = \frac{0,199}{1,256} = 0,159$$

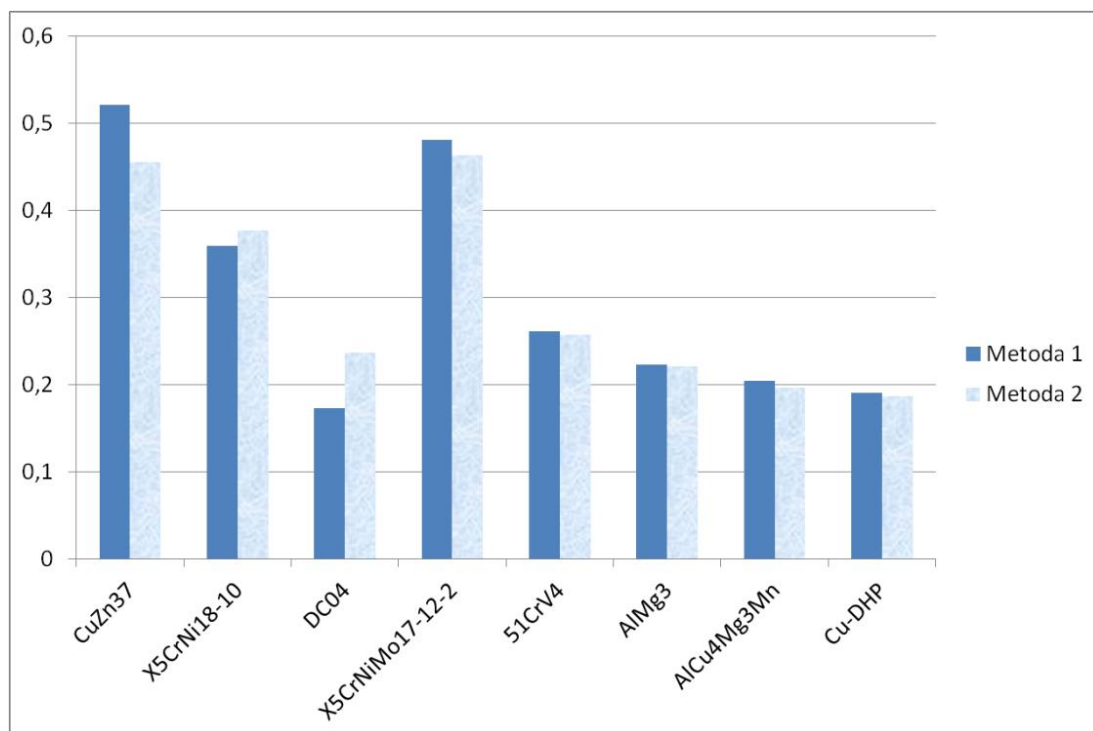


Слика 51. Епрувете од бакра пре и после експеримента

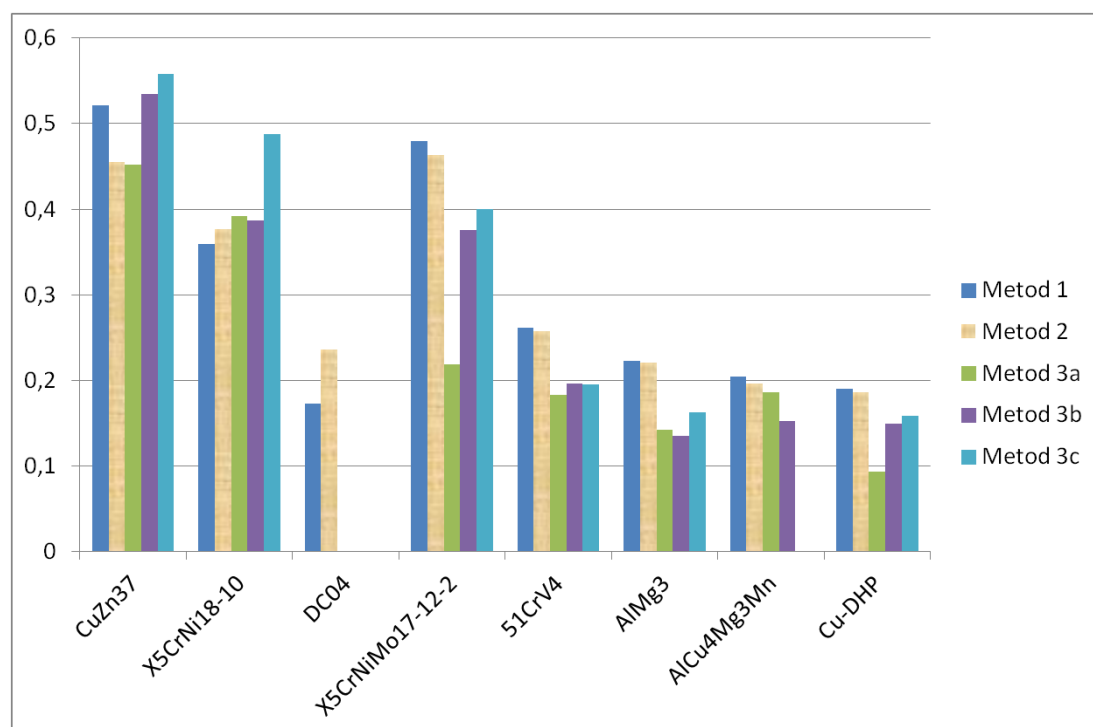
Преглед свих резултата

Табела 16. Приказ збирних резултата експеримента

Челик DC04 (Č0148) - "n" фактор - Збирни резултати			
Прва метода	0,173		
Друга метода	0,236		
Трећа метода	/	/	/
Челик X5CrNi18-10 (Č4850) - "n" фактор - Збирни резултати			
Прва метода	0,359		
Друга метода	0,377		
Трећа метода	0,392	0,387	0,488
Челик X5CrNi1712-2 (Č4574) - "n" фактор - Збирни резултати			
Прва метода	0,480		
Друга метода	0,463		
Трећа метода	0.219	0.376	0.400
Челик 51CrV4 (Č4830) - "n" фактор - Збирни резултати			
Прва метода	0,261		
Друга метода	0,257		
Трећа метода	0.183	0.196	0.195
Легура AlMg3 - "n" фактор - Збирни резултати			
Прва метода	0,223		
Друга метода	0,221		
Трећа метода	0.142	0.135	0.163
Легура AlCu4Mg1Mn (2024 T3 AIR) - "n" фактор - Збирни резултати			
Прва метода	0,204		
Друга метода	0,196		
Трећа метода	0.136	0.152	/
Бакар Cu-DHP (DVP 1 Cu. 38) - "n" фактор - Збирни резултати			
Прва метода	0,190		
Друга метода	0,186		
Трећа метода	0.093	0.149	0.159
Легура CuZn37 - "n" фактор - Збирни резултати			
Прва метода	0,521		
Друга метода	0,455		
Трећа метода	0.452	0.535	0.558



Слика 52. Вредности "n" фактора одређене методама 1 и 2



Слика 53. Преглед вредности "n" фактора одређене методама 1, 2 и 3

У табели 16 и на сликама 52 и 53 дат је преглед свих експерименталних резултата и они се могу упоређивати и тумачити у два правца. Први се односи на процену валидности самих метода одређивања "n" фактора, а други на процену интензитета ојачања испитиваних материјала.

Међутим, прво треба прокоментарисати приметне неочекиване разлике у појединим вредностима. Ако знамо да се методе 1 и 2 разликују само у техничком смислу, а да је то суштински исти поступак, делује изненађујуће разлика у случају лима DC04 (0,173 по методи 1, а 0,236 по методи 2). Објашњење је прилично једноставно и важи често у експериментима овог типа. Иако је материјал исти, ако се погледају дијаграми затезања запажа се да је врло сличан интензитет затезне чврстоће, али је значајна разлика код границе течења. Јасно је да узорци нису потпуно исти и није могуће открити да ли се ради о две табле материјала из две шарже код произвођача или варијацији карактеристика у једној шаржи из примарних металуршких разлога. Било како било, разлика је приметна, али и лако објашњива.

Трећа метода се одвија у две или три фазе и кључни разлог приметних међусобних разлика у вредностима "n" фактора је степен остварене деформације у појединој фази. Он је овде редовно знато мањи (узимајући у обзир и трећу фазу) него код метода 1 и 2, где се ефикасно користи цела зона хомогеног деформисања. То објашњава и разлике у вредностима између метода 1 и 2, с једне, и методе 3, с друге стране. Решење се налази у пробном испитивању степенасте епрувете до кидања за сваки материјал и оптимизације износа степена деформације за сваку фазу методе 3. Толико далеко се у овом експерименту није могло ићи. Метода 3 се приближава методама 1 и 2 за материјале са изразито високим вредностима "n" фактора (као што је CuZn37 или X5CrNi18-10), наравно уз остварене довољно велике деформације у свим фазама испитивања. У ситуацији где су деформације веома мале долази и до разлика у вредностима "n" фактора у односу на методе 1 и 2, али и у односу на вредности других фаза методе 3. На пример, код лима X5CrNiMo17-12-2 у првој фази остварено је издужење нешто изнад 2% што је довело до веома мале вредности "n" фактора од 0,219. Друга и трећа фаза су то кориговале. Слично се запажа код лимова AlMg3 и AlCu4Mg1Mn где су деформације биле око 4%, што је резултирало нижим вредностима "n" фактора.

Ако се говори о поузданости испитивања, методе 1 и 2 су готово референтне јер је простор за грешку сведен на најмању меру. Ипак потребан је опрез приликом израде епрувета, како у смислу тачности, тако и у погледу израде из једне табле и то тако да сви узорци буду непосредно један до другог, односно исецани из једног дела табле. Такође, опрез је потребан код израчунавања и обраде дијаграма, ако се ради ручно. Метода 3 је знатно осетљивија, пре свега због сложености геометрије епрувете која захтева врло прецизну израду, посебно код паралелности бочних страна у обе зоне (ужој и шиροј). Овде је коришћена техника сечења воденим млазом, са релативно грубом пресеченом површином. Накнадном дорадом вршена је корекција. Утицај степена деформисања по фазама је знатан, како је већ поменуто, али његова оптимизација захтева посебно пробно испитивање, што често није могуће извести. Ипак, показало се да метода 3 са сјајном идејом степенасте епрувете, може да се успешно примени уз прецизан рад и пажљивије планирање и извођење експеримента.

Ако се разматра особина деформационог ојачања испитиваних материјала погодна је поделити их на групе. Одмах треба издвојити нискоугљенични челични лим DC04 познат по, генерално, веома доброј деформабилности и вредности "n" фактора око 0,25 што показује добро деформационо ојачавање. Због тога се овај лим примењује за врло захтевне поступке обликовања, као што је дубоко извлачење.

Заједно је могуће сврстати аустенитне нерђајуће челичне лимове (X5CrNi18-10 и X5CrNiMo17-12-2) који имају солидну деформабилност и веома изражен ефекат ојачавања са вредностима "n" фактора до око 0,45. Међутим, са релативно високом чврстоћом захтевају више него двоструко веће вредности деформационих сила у односу на лим DC04.

Узорци лима 51CrV4 су највероватније у жареном или нормализованом стању што показују релативно ниске вредности затезне чврстоће. Вредност "n" фактора је повољна иако овај материјал није намењен за захтевније процесе пластичног обликовања.

Преостале су легуре обојених метала и чист бакар. Треба напоменути да се ови материјали користе у веома великом броју стања која су последица претходног хладног деформисања или термичког третмана и да ова стања суштински одређују механичке карактеристике, деформабилност и друге особине. Стање конкретног лима од месинга CuZn37 је такво да показује врло повољну пластичност са издужењем преко 60% и веома интензивно ојачавање са "n" фактором око 0,5. Све то квалификује овај лим за захтевна пластична обликовања у хладном стању. Алуминијумске легуре AlMg3 и AlCu4Mg1Mn имају умерене вредности "n" фактора (око 0,22 и 0,2 респективно) што је са гледишта ојачања задовољавајуће. Први материјал се користи са поступке пластичног обликовања у хладном стању, али захтева посебну пажњу пре свега због склоности стањењу и појавама локализованог деформисања. Друга легура је првенствено користи као конструкциони материјал и није намењена за тежа обликовања у хладном стању. На крају, чист бакар у конкретном стању има веома добру пластичност, али релативно мали интензитет ојачања ("n" фактор знатно мањи од 0,2) што је познато.

5. ЗАКЉУЧАК

Циљ овог рада је био да се изложи и размотре најважнији аспекти деформабилности танких лимова уопште, с једне стране, и ефекат деформационог ојачања код танких лимова знатно детаљније, с друге стране.

Из разматрања датог у првом делу рада може се закључити да се у свеукупном систему процене деформабилности металних материјала издваја деформабилност танких лимова као веома специфичних материјала углавном намењених процесима пластичног обликовања. У оквиру тога подвучен је значај граничне деформабилности, анизотропије и основних параметара деформабилности. Процена граничне деформабилности лимова подразумева одређивање дијаграма граничне деформабилности који представљају снажно средство за процену издржљивости лимова у процесима пластичног обликовања. Познавање карактеристика анизотропије, такође има значајно место, а нарочито што прецизније одређивање коефицијента нормалне анизотропије. У трећој групи су параметри деформабилности који се најлакше одређују и то је њихова предност. Иако не могу да свеобухватно осветле проблематику деформабилности често су једини путоказ за процену у поступцима пластичног обликовања. Одличан пример таквих параметара су механичке карактеристике које се одређују тестом једноосног затезања.

Централна тема овог рада је разматрање ефекта деформационог ојачања код танких лимова. Овај ефекат је посредно повезан са проценом деформабилности и, у извесном смислу, то су супротни појмови. Материјал који интензивно ојачава може брзо (и поред могуће повољне почетне пластичности) да дође у стање врло лоше деформабилности. Међутим, код танких лимова феномен ојачавања може да утиче на спречавање склоности неких материјала ка локализованом деформисању и остваривање продужавања процеса обликовања са релативно уједначеним дистрибуцијама деформацијама.

У раду је показано да су два начина веома повољна за исказивање, односно представљање овог ефекта: криве ојачања и експонент деформационог ојачања или "n" фактор. Криве ојачања генерално показују напонско-деформационо понашање материјала у области пластичности и посредно помажу у разумевању деформабилности. "n" фактор је неименовани број који директно показује интензитет ојачавања, односно нагиб криве ојачања. Због тога и због начина деловања ефекта ојачавања на хомогенизацији деформационих поља та величина је постала веома значајан показатељ деформабилности уопште, а нарочито за оне случајеве када је лим напрегнут затежућим напонима у равни у условима блокираног обода или његовог врло отежаног клизања.

Опсежним експериментом тестиране су три методе одређивања "n" фактора. Може се закључити да су методе 1 и 2 врло поуздане и да омогућавају тачне резултате којима могу сматрати референтним. Метода 3 је осетљивија и захтева врло тачну израду епрувете сложеније геометрије уз потребу детаљнијег планирања експеримента. Коначно, може се закључити да су све три методе употребљиве, при чему треба дати предност методи 1.

Да би се тестирале поменуте три методе искоришћено је осам материјала, четири челична лима (нискоугљенични DC04, два аустенитна нерђајућа, X5CrNi18-10 и X5CrNiMo17-12-2, један од опружног челика 51CrV4) и четири лима од обојених метала (AlMg3, AlCu4Mg1Mn, CuZn37 и Cu-DHP). Карактеристике ових материјала су потврђене, али се може закључити да велики значај има стање материјала поред хемијског састава, пре свега код обојених метала и легура.

6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Девеџић Б.: Основи теорије пластичног деформисања метала, Машински факултет у Крагујевцу, 1975.
- [2] Девеџић Б.: Пластичност и обрада метала деформисањем, Научна књига Београд, 1992.
- [3] Александровић С.: Деформабилност, циклус предавања за ФИАТ Аутомобили Србија, 7. предавање, септембар 2014.
- [4] Александровић С.: Савремени поступци пластичног обликовања, скрипта, Moodle портал Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2018. год.
- [5] Advanced high-strength steels application guidelines version 6.0, World Auto Steel, april 2017.
- [6] Кочовски Б.: Металургија легура и обојених метала 2, Технички факултет у Бору, 1999.
- [7] Интернет страница: <http://hr.304havensmetal.com/special-steel/spring-steel/51crv4-spring-steel.html>, приступљено: 24.09.2020.
- [8] Интернет страница: <https://www.pxgroup.com/sites/default/files/316L1.4404.pdf>, приступљено: 25.09.2020.