



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно Машинство

Предмет: Производне технологије

Број индекса: 736/2014

Ненад Р. Стојковић

**Угаоно савијање челичних лимова са
разматрањем примера из
индустријске праксе
завршни рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Србислав Александровић - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____



Основне студије: МАШИНСКО ИНЖЕЊЕРСТВО

Студијско подручје (усмерење): ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО

Предмет: ПРОИЗВОДНЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ (ТПО)

Кандидат: Ненад Стојковић 736/2014

ПРИЈАВА ЗАВРШНОГ РАДА

Тема рада:

УГАОНО САВИЈАЊЕ ЧЕЛИЧНИХ ЛИМОВА СА РАЗМАТРАЊЕМ ПРИМЕРА ИЗ ИНДУСТРИЈСКЕ ПРАКСЕ

Задатак:

У првом, општем делу рада кандидат треба да изложи прегледно разматрање о савијању (основне дефиниције, класификација поступака, угаоно савијање и профилно савијање, анализа процеса, напони и деформације, моменти савијања, развијено стање, гранични параметри, еластична повратност, једноугаоно и двоугаоно савијање, деформациона сила, калибрисање, итд.), као и разматрање о профилном савијању са акцентом на машине, алате и операције процеса обликовања.

У другом, практичном делу рада треба приказати анализу процеса обликовања конкретног комада (геометрија, карактеристике материјала, развијено стање, операције савијања, одређивање технолошких параметара за сваку операцију, критичко разматрање, предлози за побољшање актуелне погонске технологије итд.).

Обезбедити узорак материјала и посебно извести експериментално испитивање затезањем ради одређивања карактеристика обрадивости реалног материјала.

На крају дати закључна разматрања о теми, и посебно о анализи конкретног примера.

Крагујевац, 14. 04. 2016.г.

Ментор:

Др Србислав Александровић, ред. проф.

Препоручена литература:

- [1] Александровић С., Стефановић М.: Технологија пластичног обликовања метала, уџбеник, Машински факултет Крагујевац, 2010.
- [2] John A. Waller: Press tools and presswork, Portcullis Press, Bristol, England, 1978.
- [3] Metal Forming Handbook, Schuler, Springer - Verlag, Berlin - Heidelberg, 1998.

РЕЗИМЕ

У оквиру завршног рада проучена је технологија угаоног савијања челичних лимова и урађена је детаљна анализа физичких процеса и појмова који се јављају приликом обликовања угаоним савијањем. Приказане су и објашњене опште карактеристике машина и опрема која се користи при овој обради. На конкретном примеру приказана је анализа процеса профилног савијања.

Кључне речи: *Угаоно савијање челичних лимова, процеси и параметри угаоног савијања, машине и опрема за угаоно савијање*

SUMMARY

As part of the final paper studied was the technology of angular bending of steel sheets and made a detailed analysis of the physical processes and concepts that occur in bending. Those are generally displayed machines and equipment used in the workup. In the specific industrial example shown is the analysis at a press brake operations.

Keywords: *Angular bending steel plates, processes and parameters in the bending, machinery and equipment for bending*

САДРЖАЈ

1. УВОД.....	1
2. ОБЛИКОВАЊЕ ЛИМА САВИЈАЊЕМ.....	2
2.1 Основни циљеви	2
2.2 Елементарни појмови и класификација.....	2
3. АНАЛИЗА ПРОЦЕСА УГАОНОГ САВИЈАЊА.....	6
3.1. Опште напомене.....	6
3.2. Једноугаоно савијање.....	6
3.3. Двоугаоно савијање.....	8
3.4. Напонско-деформациони односи у зони савијања.....	9
3.5. Положај неутралног слоја (осе).....	12
3.6 Одређивање димензија полазног комада - развијено стање.....	14
3.7. Минимални допуштени унутрашњи полупречник.....	17
3.8 Еластична повратност и највећи гранични полупречник савијања.....	20
3.9 Напони у зони савијања.....	24
3.9.1 Напони при чистом пластичном савијању.....	26
3.9.2 Положај неутралног напонског слоја.....	30
3.9.3 Напони при еластично-пластичном савијању.....	31
3.10 Моменти и силе савијања.....	31
3.10.1 Моменти унутрашњих сила при еластично - пластичном савијању.....	31
3.10.2 Моменти унутрашњих сила при чисто пластичном савијању.....	33
3.11 Одређивање деформационе силе при савијању у алату.....	34
3.11.1 Деформациона сила при двоугаоном савијању.....	34
3.11.2 Деформациона сила при једноугаоном савијању у отвореном алату.....	38
3.11.3 Деформациона сила при једноугаоном савијању у затвореном алату.....	39
3.12 Профилно савијање.....	41
3.12.1 Машине, алати, процес обликовања.....	41
4. АНАЛИЗА ПРОЦЕСА ПРОФИЛНОГ САВИЈАЊА НА КОНКРЕТНОМ ПРИМЕРУ.....	45
4.1 Геометрија и карактеристике комада.....	45
4.1 Одређивање карактеристика материјала.....	45
4.2 Облик и димензије развијеног стања.....	49
4.3 Операције обликовања и деформационе силе.....	50
5. ЗАКЉУЧАК.....	52
6. ЛИТЕРАТУРА.....	53

1. УВОД

Угаоно савијање спада у групу обраде метала пластичним деформисањем и данас је веома заступљена у металној индустрији, како у серијској, тако и у појединачној производњи. Омогућава израду широког асортимана производа, са димензијама од неколико делова милиметра па до неколико метра. Делови сложених геометријских карактеристика израђују се у више операција.

Полазни материјал (полуфабрикант) је најчешће лим у виду траке или табле, што је детаљно обрађено у овом раду, али то може да буде жица, пун профил и цев. Дебљина лимова за савијање креће се од стотих делова милиметра па до неколико десетина милиметра. Савијање танких лимова се обавља у хладном стању материјала, док се дебели претходно загревају.

Изводи се најчешће у алатима постављеним на универзалним пресама (ексцентарске, коленасте, хидрауличне итд) или на специјалним пресама. С обзиром на облик и број места савијања може бити: једно, дво и вишеугаоно.

Најчешће се за обраду користи алат који има два основна дела: доњи део који се назива калуп, и горњи део који се назива притискивач. Ова два елемента омогућавају савијање метала у задати облик на одговарајућим пресама.



Слика 1 - Алат на преси за профилно савијање у захвату (детал)

Савијање се успешно може комбиновати са осталим обрадама метала, на пример са ласерским сечењем, а у комбинацији са заваривањем користи се поред машинске индустрије и у аутомобилској, електронској, индустрији беле технике, пољопривредне механизације и бродоградњи.



Слика 2 - Фотографија делова добијених ласерским сечењем и угаоним савијањем

2. ОБЛИКОВАЊЕ ЛИМА САВИЈАЊЕМ

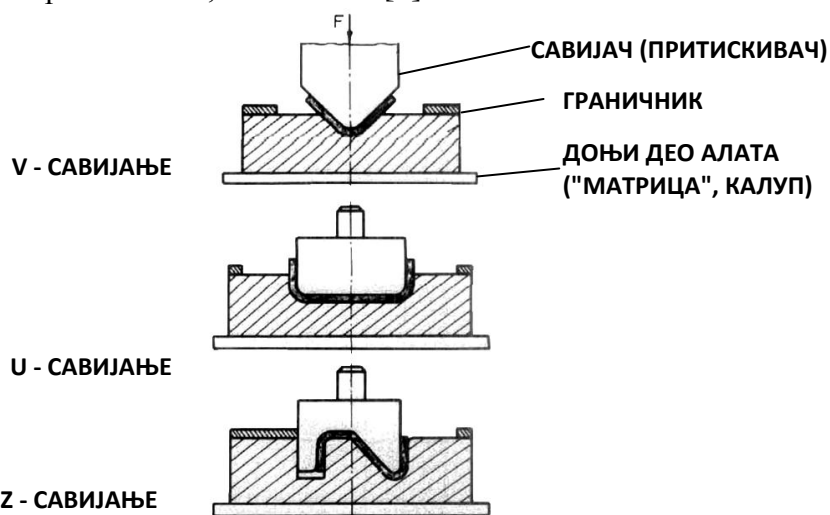
2.1 Основни циљеви

Основни циљеви овог рада су:

- 1) Системско разврставање различитих поступака савијања и указивање на најзначајније технолошке спецификације;
- 2) Одређивање развијене дужине (дужине дела пре савијања);
- 3) Одређивање граничне способности савијања (минималног и максималног полупречника савијања).
- 4) Одређивање износа еластичног исправљања после савијања;
- 5) Одређивање максималне силе потребне за савијање у појединим случајевима (тј. одређивање неопходне јачине машине потребне за савијање);
- 6) кратак осврт на алате за савијање
- 7) на практичном примеру применити претходна знања.

2.2 Елементарни појмови и класификација

Савијање спада у најчешће операције обраде метала деформисањем. У многим случајевима то је само једна од операција сложенијег процеса обраде, тј. оно се може комбиновати са извлачењем, просецањем, итд. На тај начин се могу обрађивати, како радни предмети од lima, тако и остали, као и различити полупроизводи (цеви, плоче, профилисан материјал, итд.). У даљем ће разматрању ове проблематике бити, углавном, ограничено на случајеве савијања lima, али већина изведених закључака има и шири значај. У хладном стању врши се савијање делова од lima и плоча чије се дебљине крећу у врло широком опсегу - приближно $0,01 - 100\text{mm}$. [1]



Слика 3 - Основни видови савијања (V, U и Z савијање)

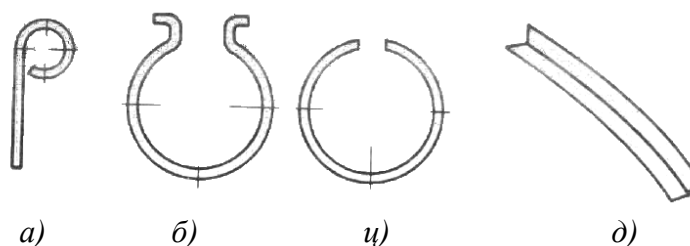
Зависно од димензија и облика радног предмета, предходног облика и врсте производње, савијање се, с обзиром на машине и алате, може извршити на више начина:

- помоћу алата постављених на пресе различитог типа (ексцентарске, кривајне, фриктионе, хидрауличне);
- на специјалним машинама за савијање и профилисање;
- на машине за савијање са ваљцима;

– помоћу специјалних механизованих и ручних уређаја.

Даље излагање ће се претежно односити на тзв. угаоно савијање. Оно се врши у алатима постављеним на универзалне пресе (ексцентарске, хидрауличне, и др.) или на специјалне пресе за пресавијање и може, с обзиром на облик и број места савијања, бити: једно, дво - и вишеугаоно савијање (слика 3.). У истом смислу често се за једноугаоно савијање користи симбол V - савијање, а за двоугаоно U - или [- савијање. Такође је у примени и ознака Z - савијање. Јасно је да се могу остварити и најразличитије комбинације ових основних облика.

Поред угаоног савијања, такође се често изводе и операције кружног савијања, кружног завијања крајева лима, савијање у облику цеви, итд. (слика 4.). Уски профилисани делови, као и неки од равног лима, могу се савијати са релативно великим полупречницима кривине, уз истовремено затезање (слика 4.д).

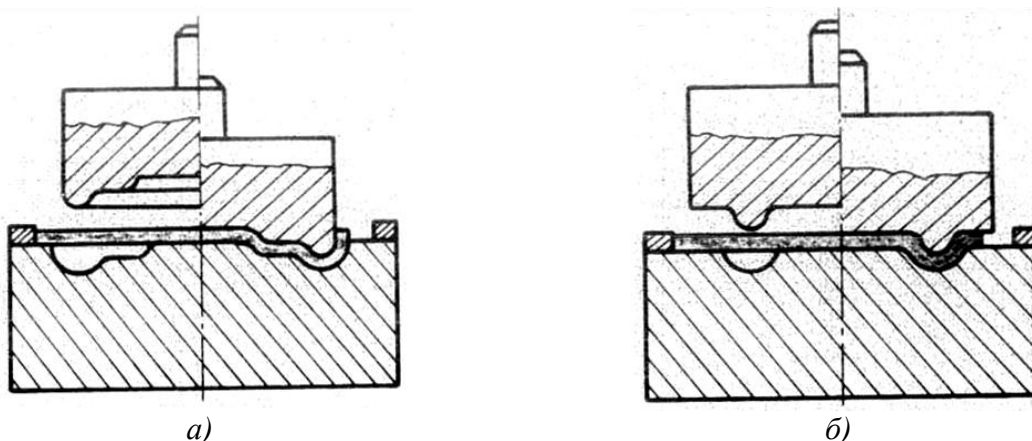


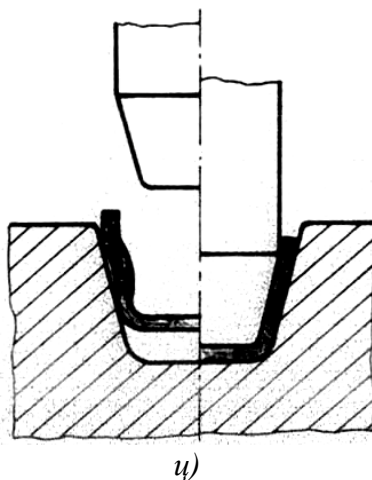
Слика 4 - Примери кружног савијања

Поред најразличитијих могућих комбинација приказаних или сличних видова савијања, постоји и низ других операција које по свом типу такође припадају савијању. На слици 4. су приказани само неки такви примери.

Број операција савијања при обради неког дела зависи од његове конфигурације, жељене тачности, примењене технологије, обима и других услова производње. Наиме, неки сложенији облик могуће је постићи, или у неколико операција применом једноставних алата, или у једној операцији (односно уопште мањем броју операција) - помоћу сложенијих алата. Које ће решење бити повољније у конкретном случају зависи од низа технолошко - економских и других околности.

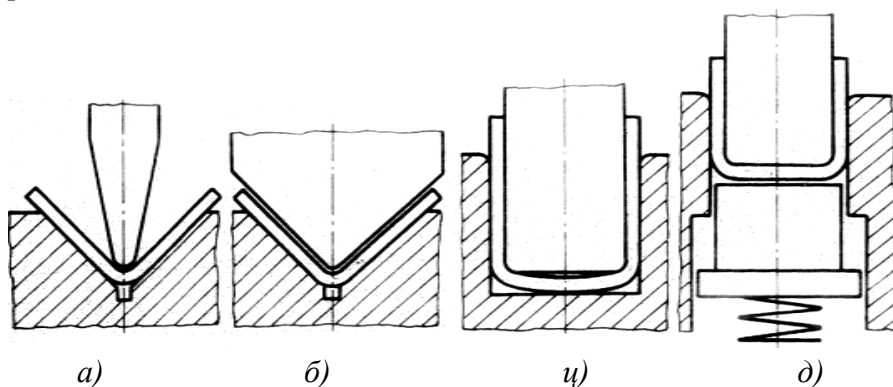
Угаоно савијање мањих и средњих делова се најчешће врши у специфичним алатима на универзалним пресама, а већих на пресама за пресавијање (нем. Abkantpressen). На сл. 6. су приказани најчешћи облици V - и U - савијања: а) слободно V- савијање; б) V- савијање у затвореном простору; ц) U - савијање без противдржача (примењује се за мање тачне делове); д) U - савијање са противдржачем (примењује се за тачније делове).



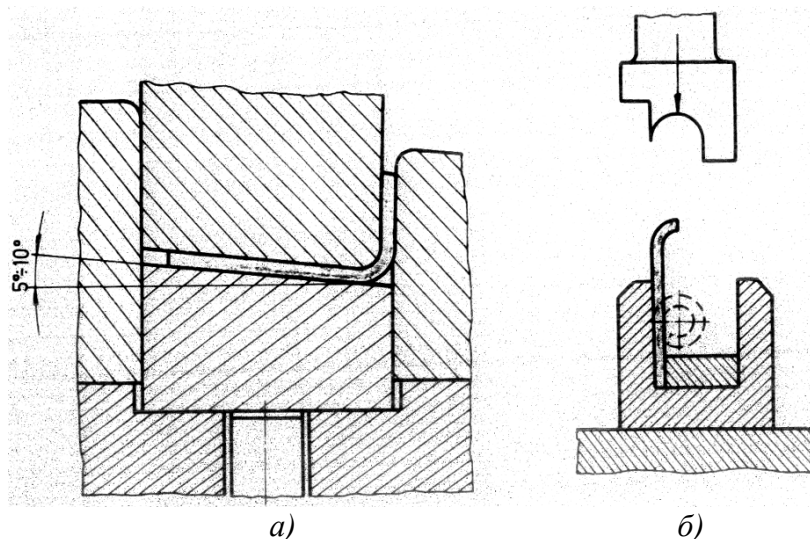


Слика 5 - Примери осталих видова савијања: а) профилисање савијањем; б) израда жљеба савијањем ("утискивање"); ц) поравнавање (исправљање)

Противдржач је еластичан елемент алата - под притиском опруге или сабијеног ваздуха - и има задатак да у току савијања спречи евентуално померање (клизање) лима на једну страну (и тиме настајање савијених кракова неодговарајуће дужине), као и одвајање лима од чела савијача при двоугаоном савијању (непожељно савијање централног дела). Осим тога, противдржач служи и за изbacивање савијеног дела из алата после изведене операције. [5]



Слика 6 - Типични видови V и U савијања: а) и б) V - савијање; ц) и д) U - савијање

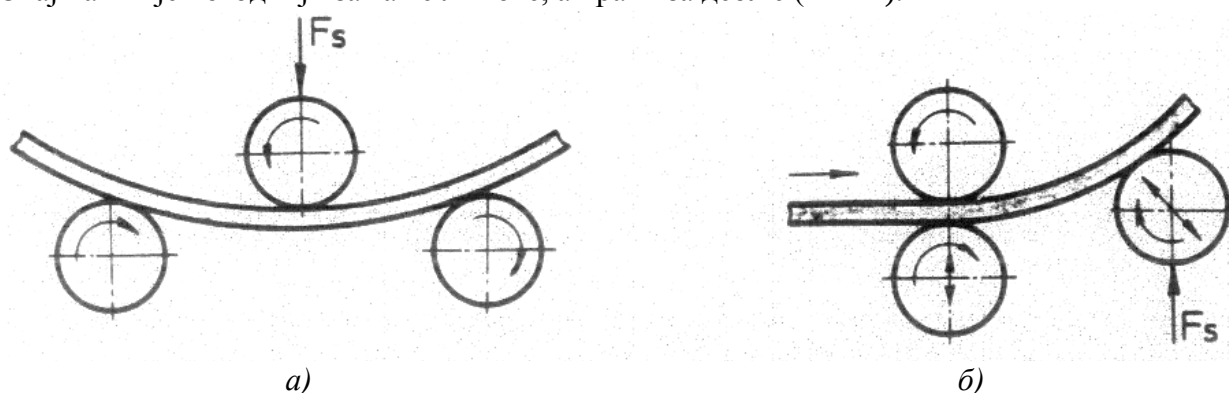


Слика 7 - Савијање несиметричног дела: а) једноугаоно савијање; б) завијање крајева

Пример савијања једног несиметричног дела приказан је на сл. 7.а., где се мора применити противдржач са одговарајућом силом, јер се појављује и бочна компонента силе савијања која би могла довести до померања лима бна једну страну. На сл. 7.б. шематски је приказан најчешће примењен принцип завијања крајева.

У текућој терминологији понекад се користи и назив слободно савијање, при чему се подразумева савијање без истовременог затезања, као и обично савијање без завршног јачег сабијања (поравнавања, калибрисања) материјала.

Шема кружног савијања лимов помоћу ваљака приказана је на сл. 8. Оно се примењује, углавном, за израду цилиндричних делова већег пречника (добоша, резервоара,...). Са слике се види да заправо постоје две могућности остварења овог савијања. У првом случају (а) средњи ваљак је потискивајући и може мењати свој положај по висини, док су два доња ваљка само окретна око својих непомичних осовина. У другом случају, (б) међутим, притискајући ваљак је крајњи, тј. он има ексцентричан положај. Овај начин је погоднији за тање лимове, а прави за дебље ($>2mm$).



Слика 8 - Принципијална шема различитих могућности кружног савијања помоћу ваљака: а) са средњим притискајућим ваљком; б) са крајњим притискајућим ваљком

Да би могло да се оствари трајно (пластично) савијање, потребно је да буду испуњена следећа два основна услова:

- 1) на део мора деловати момент савијања;
- 2) напони који се при томе јављају у зони савијања морају испунити услов пластичног течења, тј. довести до пластичне деформације материјала.

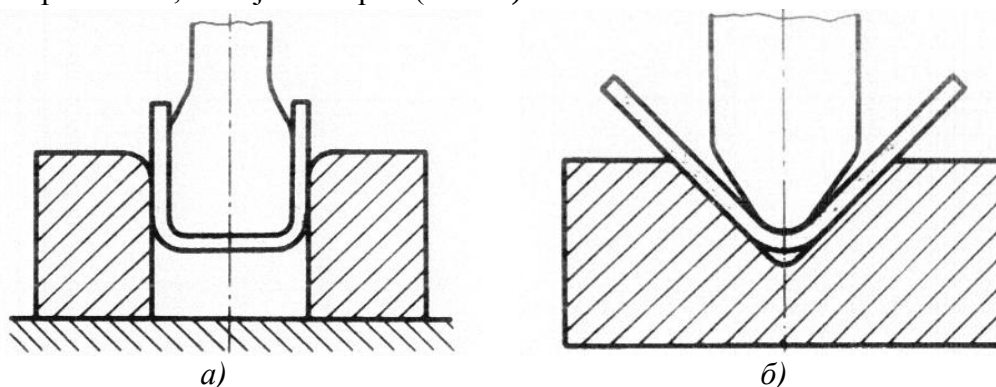
Потребан момент се остварује најчешће на тај начин што механичка сила (сила савијања) делује преко савијача на део ослобођен на два ослонца или учвршћен на једном крају. Знатно ређе се за савијање примењују други начини преношења силе - помоћу хидрауличног медијума, помоћу гуме и др.

3. АНАЛИЗА ПРОЦЕСА УГАОНОГ САВИЈАЊА

3.1. Опште напомене

Код угаоног савијања деформација је локализована, тј. ограничава се само на зону савијања. Основна технолошко-конструкционе карактеристике ове операције су: полупречник и угао савијања.

Ако бочне стране матрице нису закошене, тако да се долази ни до каквог јачег налегања лима на њих, алат се назива отвореним. При томе се не користи ни противдржач (сл. 9.а.). У противном, алат је затворен (сл.9.б.).



Слика 9 - Слободно савијање: а) у отвореном алату; б) у затвореном алату

У даљем ће се разматрати најтипичнији случајеви угаоног савијања: једноугаоно (V)- и двоугаоно (U) савијање.

3.2. Једноугаоно савијање

Ово савијање може бити:

- слободно савијање (које се може остварити у отвореном и затвореном алату);
- савијање са поравнавањем (обавља се у затвореном алату);
- савијање са завршним калибрисањем (калибрисање се може вршити у оквиру процеса савијања као његов завршни стадијум, или накнадно - као посебна операција после савијања).

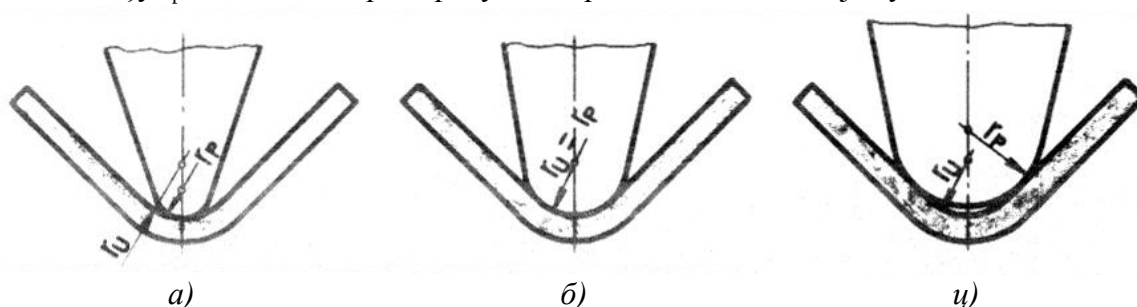
При слободном савијању у затвореном алату процес се завршава у тренутку када краци савијеног дела постану паралелни бочним странама - радним површинама матрице. При томе је полупречник заобљења врха притискивача (савијача) r_p обично нешто већи од унутрашњег полупречника заобљења савијеног дела r_u , а између површина алата и лима се појављује зазор, тако да се на овај начин не могу ни добити делови веће тачности (сл. 9.б).

У случају савијања са поравнавањем долази до извесног мањег калибрисања, како заобљења, тако и кракова дела, који онда чврсто налажу на радне површине матрице и савијача.

Уколико је сила у овом завршном периоду знатно већа од потребне силе савијања, онда је у питању калибрисање. При томе долази и до одговарајућег сабијања материјала по дебљини. Између овог и претходног случаја не постоји нека оштра граница, јер поравнавање постепено прелази у калибрисање.

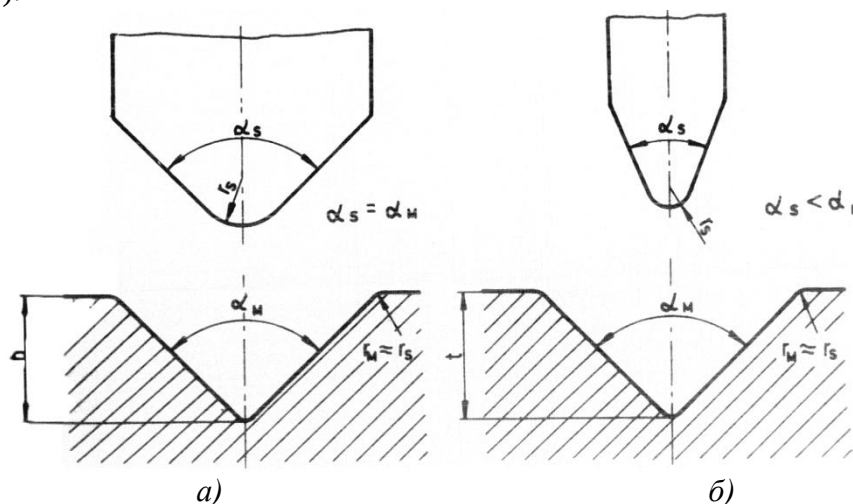
Савијање са поравнавањем, односно калибрисањем, више се примењује него слободно савијање, јер обезбеђује већу тачност.

Напомена: шире посматрано, односи величина полупречника заобљења притискивања r_p и унутрашњег полупречника савијања дела r_u могу при слободном савијању бити различити (сл. 10). Који ће од приказаних типичних случајева наступити зависи у највећој мери од односа $r_p/1$ (1 - распон ослонца у алату). Наиме, при малом односу $r_p/1$ биће $r_p > r_u$ (а) и обратно (ц). Испитивања су показала да се при приближном односу $r_p/1=0,15$ постиже изједначавање полупречника заобљења притискивача (r_p) и унутрашњег полупречника кривине савијеног дела (r_u), тј. $r_p = r_u$ (б). Наравно да је овај износ од 0,15 само оријентациони и да он може унеколико варирати у зависности од својства материјала и дебљине лима. Треба приметити да је за случај $r_p = r_u$ потребна и најмања сила савијања. Зато о овим околностима треба водити рачуна при конструисању алата и у том сислу користити одговарајуће препоруке из литературе. Међутим, у пракси се, ипак, најчешће не могу остварити идеални односи $r_p/1$, тако да на веће или мање разлике између r_p и r_u обично треба рачунати при слободном савијању.



Слика 10 - Шема различитих могућности односа полупречника заобљења притискивача и унутрашњег полупречника кривине савијеног дела при једноугаоном слободном савијању

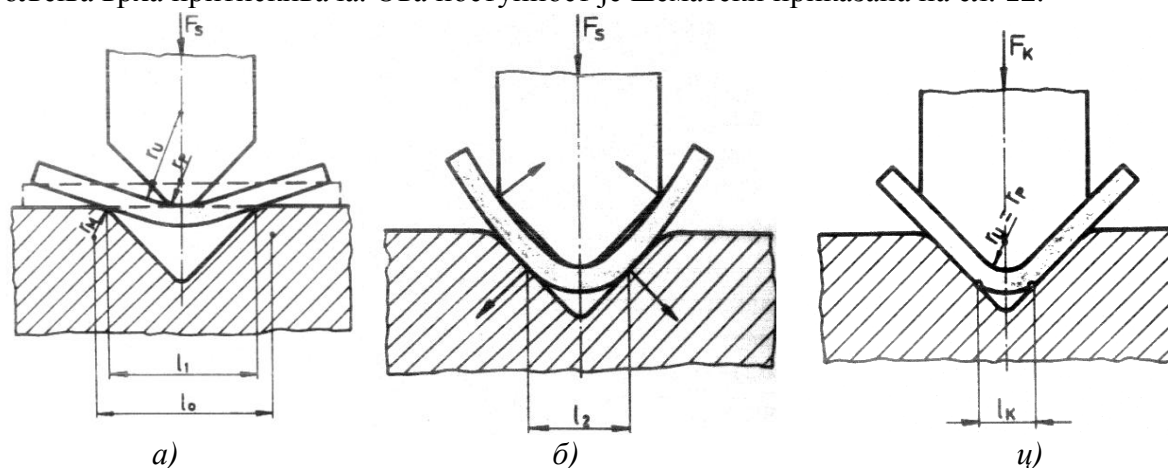
Савијач може бити обликован тако да његове бочне стране заклапају исти угао као и стране матрице (сл. 11.а.) или је овај угао мањи (сл. 11.б.). Први случај је више у примени при серијском савијању већег броја делова који треба да имају релативно тачне димензије и облик (врши се и мање или веће калибрисање на крају савијања), док је други случај више у примени при профилисању на специјалним машинама за профилисање (нем. Abkantpressen).



Слика 11 - Шематски приказ могућих односа између углова које заклапају бочне стране савијача и матрице

Читав процес савијања је поступан, тј. лим у потпуности належе на радне површине алата тек у коначном стадијуму, док се у претходном периоду постепено смањује

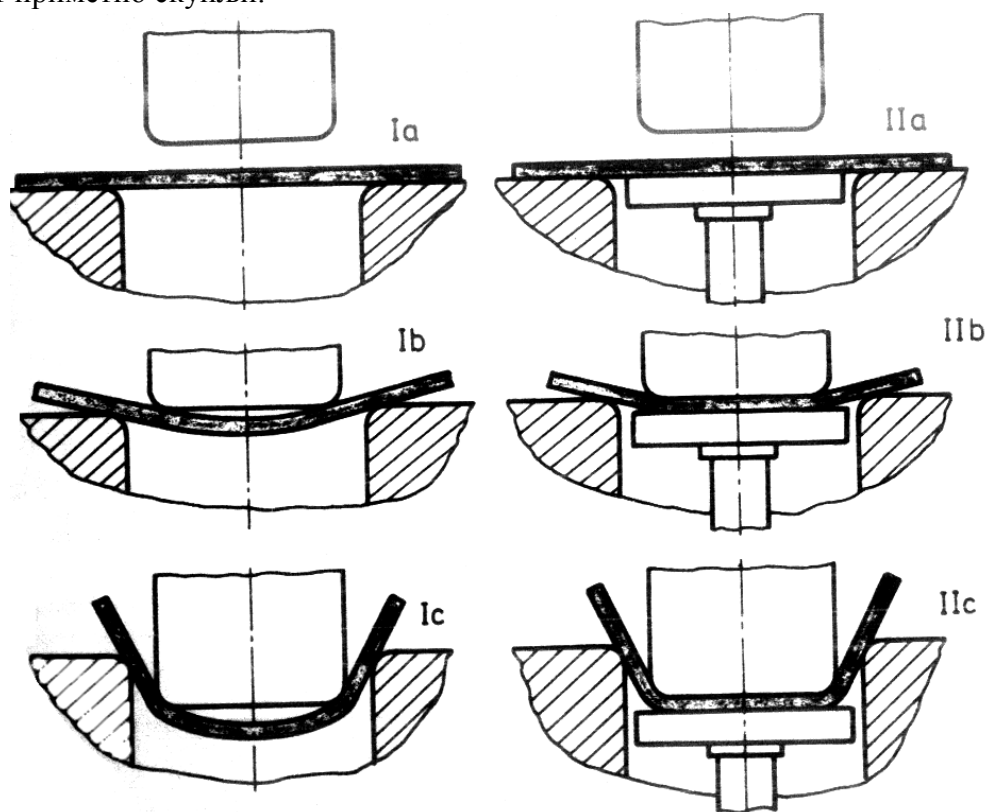
полупречник кривине савијеног дела - све док на крају не достигне износ полупречника заобљења врха притискивача. Ова поступност је шематски приказана на сл. 12.

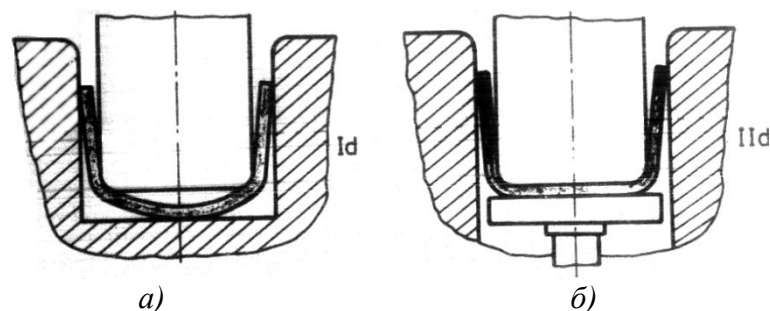


Слика 12 - Карактеристичне фазе процеса једноугаоног савијања

3.3. Двоугаоно савијање

И код двоугаоног савијања се могу уочити карактеристичне фазе процеса, које добрим делом зависе и од тога да ли се оно изводи као слободно, или са противдржаčem лима. Шематски приказ ових односа дат је на сл. 13. Напомиње се да би савијање без противдржача, поред ризика повећане нетачности услед евентуалног клизања дела, захтевало и знатно већу силу завршног калибрисања ради поравнавања избоченог (савијеног) средњег чеоног дела (која је већа него сила потребна за савијање и савладавање отпора противдржача). Међутим, треба имати у виду да је у овом другом случају алат приметно скупљи.





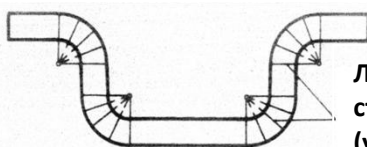
Слика 13 - Карактеристичне фазе процеса двоугаоног савијања: а) без противдржача (слободно савијање); б) са противдржаčem

Иако ће у току даљег излагања низ појединости и објашњења бити приказани за случај једноугаоног савијања, они ће најчешће моћи да се примене и на двоугаоно (на пример, померање неутралне осе, минимални полупречник савијања и др.). Ипак, двоугаоно савијање има и низ специфичности (потребна сила, еластично исправљање, алати,...) на које ће се, по потреби, у даљем посебно указивати.

3.4. Напонско-деформациони односи у зони савијања

Мада се при савијању мора остварити пластична деформација, она се ипак не појављује у његовој почетној фази. Осим тога, често је и на крају савијања, а пре растерећења, удео еластичне деформације у укупно оствареној знатан. Стога се може рећи да читав процес савијања карактеришу еластично-пластичне деформације. Ове деформације, односно одговарајући напони, имају различит карактер са сваке стране лима који се савија, јер је слој материјала са стране савијача (са унутрашње стране) изложен притискивању (због чега се у њему врши скраћивање влакана материјала у подужном правцу), а са спољне стране затезању (влакна се издужују). Између ова два слоја налази се неутрални слој чија се дужина у односу на првобитну не мења услед савијања. Другим речима, у неутралном слоју су дужинске (линијске) деформације једнаке нули. Он се назива још и неутрална површина, а при разматрању одговарајућих шематских приказа у виду пресека обично се говори о неутралној оси.

Величине уздужних деформација (дуж замишљених влакана расту идући од неутралног слоја ка спољним површинама, где достижу максималне износе. Њихова промена је при томе приближно линеарна. Наиме, истраживања су показала да се у случају савијања може без веће грешке применити тзв. хипотеза равних пресека према којој пресеци управни на раван лима пре савијања остају такви и после њега, тј. остају равни, мењајући само своју оријентацију у току процеса (сл. 14.). Строго посматрано, ово није сасвим тачно зато што се у уском централном делу, услед извесних непоклапања неутралних оса деформација и напона и њиховог померања у току процеса (в. каснија објашњења), нека влакна најпре скрате, а онда издуже, али то се практично занемарује.



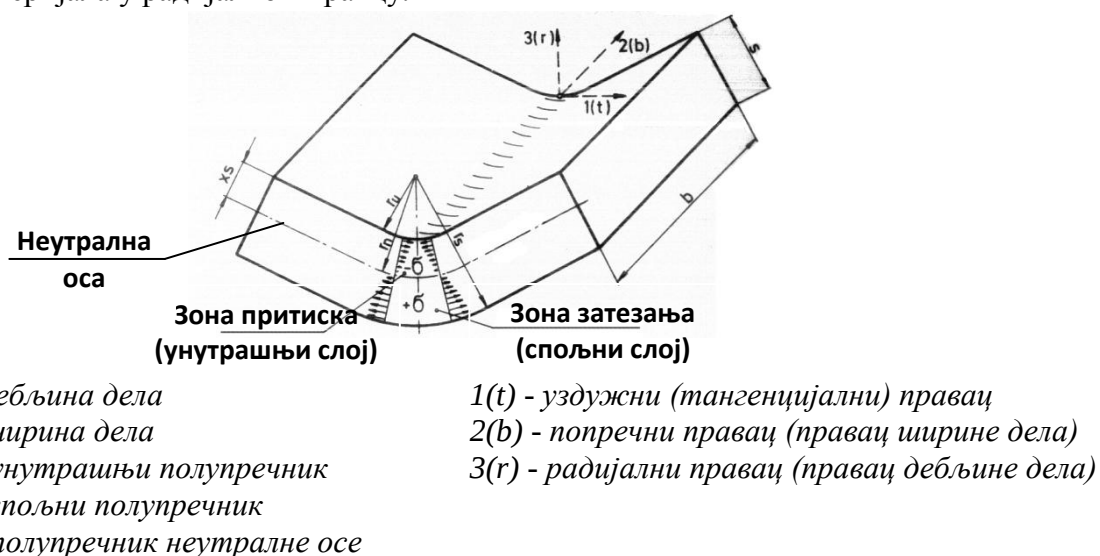
Линије обележене на бочним странама лима пре савијања (управно на површину лима)

Слика 14 - Задржавање управности положаја пресека нормалних на површину лима при савијању

Слично је и са одговарајућим напонима у уздужном правцу, с тим што је њихов пораст такође равномеран и линеаран само у случају еластичног савијања, али се са настајањем пластичних деформација он мења, одступајући мање или више од линеарног распореда (мада напони и даље расту идући ка спољним површинама). Ближе појединости у овом смислу даће се у оквиру даљег излагања. Ови основни односи приказани су шематски на сл. 15. и 16. где су такође наведене и различите ознаке које ће касније бити коришћене. Очигледно је даје при овој анализи погодено користити поларни координатни систем.

На месту савијања под одређеним условима може доћи до релативно јаког деформисања дела, тј. до промене његовог попречног пресека (смањења дебљине у затегнутој зони, односно повећања у притисној, и евентуалне промене ширине-нарочито код уских делова). Услед тога неутрални слој неће пролазити кроз геометријску средину (тежиште) пресека већ ће се померити за одговарајући износ ка притиснутој зони.

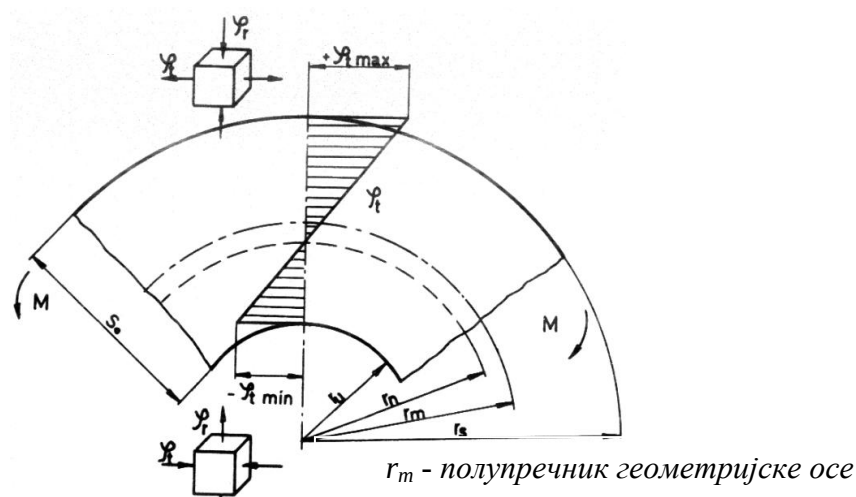
Услед овога, максималне уздужне деформације на унутрашњој и спољној површини неће бити исте (сл. 16.). Осим тога, и у радијалном правцу се појављују одговарајући радијални напони σ_r , који расту од нуле (на спољним површинама) до максималног износа (на месту неутралног слоја). Ови напони су последица узајамног притискивања појединих слојева материјала у радијалном правцу.



Слика 15 - Притиснута и затегнута зона при савијању и положаја неутралног слоја

У стварности се при сваком савијању јавља троосно деформационо стање, али је за $b/s > 5$ деформација у правцу ширине дела обично занемарљиво мала па се најчешће може сматрати да је деформационо стање раванско (на пример, у затегнутој зони: истезање у уздужном правцу $+\epsilon_t$ и радијално стање $-\epsilon_r$). Наиме, при савијању делова веће ширине ($b > 5s$) основни облик попречног пресека се практично мења, јер је тада деформација у правцу ширине отежана, тако да се материјал углавном стањује на рачун извршног издужења у уздужном (тангенцијалном) правцу. Ово је најчешћи случај при савијању ($\phi_b = 0$).

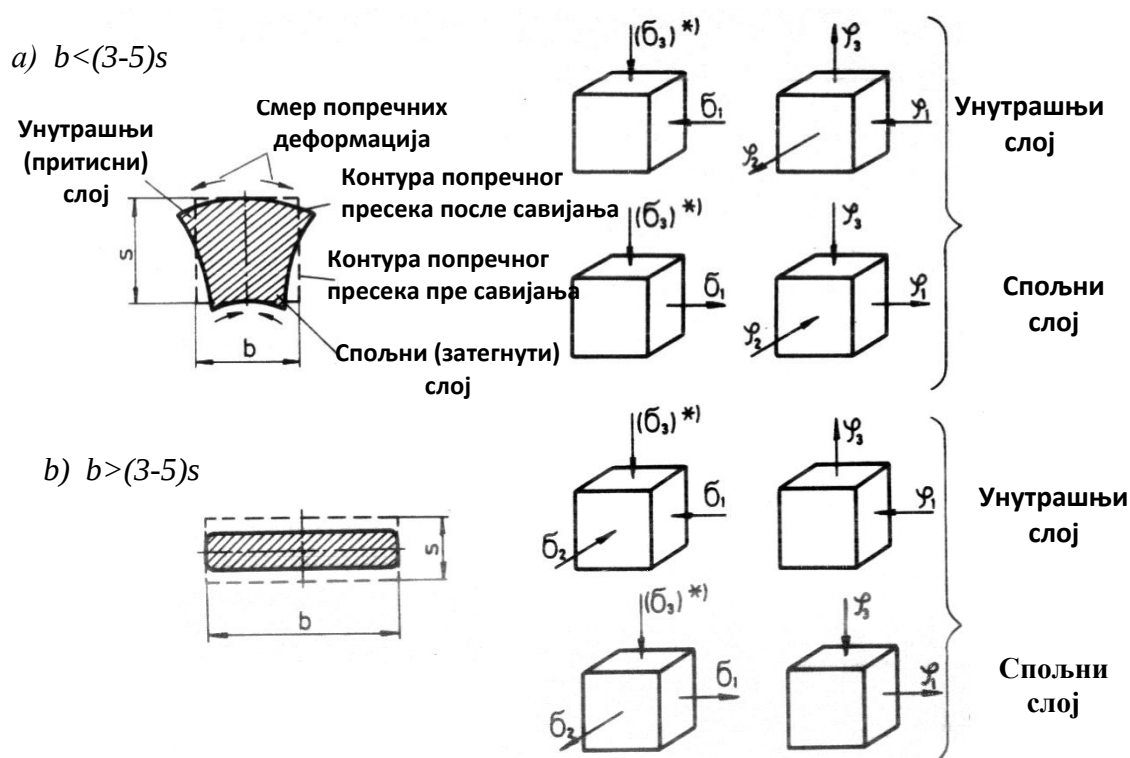
Напонско стање је при томе просторно, јер се мора појавити попречни напон σ_b услед отежане деформације по ширини дела (он је у том случају средњи нормални напон). Међутим, при савијању танког лима са довољно великим радијусима кривине може се напон у правцу дебљине лима занемарити, па тада напонско стање такође прелази у раванско.



Слика 16 - Распоред уздужних деформација по висини пресека савијене зоне

Код уских делова (оријентационо $b < 5s$) појављује се још и примена деформација по ширини, а основни облик попречног пресека се мења прелазећи од правоугаоног у трапезни и деформационо стање постаје просторно. Напонско стање је у том случају приближно раванско, а ако се и напон у правцу дебљине занемари (за случај довољно танких лимова и великих радијуса кривине) онда је напонско стање једноосно.

У даљем ће се усвојити да су главне осе напона и деформација постављене тако да уздужни (тангенцијални) правац одговара оси 1, попречни оси 2, а радијални оси 3. На сл. 17. приказане су промене пресека на месту савијања за случај савијања делова мање ширине (а) и велике ширине (б), као и одговарајуће напонско деформационе шеме. У оквиру даљег разматрања подразумеваће се савијање траке релативно велике ширине ($b > 5s$).



Слика 17 - Шема напонско-деформационих стања при савијању делова: а) мале; б) велике ширине

Уколико се на крају савијања у алату врши и калибрисање (мање-више ударно оптерећење), наведене шеме напонско-деформационих стања се мењају (напонско стање је тада просторно, а сва три главна напона су притискајућа).

На крају овог уводног излагања може се указати на потребу да се у оквиру пројектовања технолошког процеса савијања, у општем случају реше следећи проблеми:

- одређивање врсте, броја и редоследа операција;
- одређивање димензија несавијеног дела - припремка (тзв. развијене дужине);
- одређивање минималног дозвољеног полупречника савијања;
- одређивање угла еластичног исправљања (повратности);
- дефинисање значајних конструкционих параметара алата;
- одређивање потребне деформационе силе и деформационог рада (тј. дефинисање машине за извођење операције).

3.5. Положај неутралног слоја (осе)

Напред је напоменуто да се при савијању неутрални слој помера од геометријске осе ка притиснутој зони. Дужина замишљених влакана материјала у овом слоју се не мења услед савијања. Познавање његовог положаја је значајно првенствено зато што се тиме омогућује одређивање дужине неутралне осе, односно почетних димензија дела - пре савијања (према којима је потребно одсећи лим или израдити просецањем раван део који ће се затим савити ради добијања радног предмета задатог облика и димензија). Осим тога, на основу положаја неутралног слоја може се одредити и величина најмањег дозвољеног полупречника савијања (као што ће то касније бити приказано). [5]

У случају малих еластично-пластичних деформација (на пример, при савијању са релативно великим полупречником кривине) може се сматрати да неутрални слој практично пролази кроз тежиште пресека, па ће полупречник који одређује његов положај бити:

$$r_n = r_u + \frac{s}{2} \quad (1)$$

При томе би, очигледно, издужења спољних влакана (ϵ_s односно ϕ_s) било једнако скраћењу унутрашњих (ϵ_u односно ϕ_u), тј. $\epsilon_s = -\epsilon_u$ (или $\phi_s = -\phi_u$).

Исто тако, практично се најчешће сматра да при савијању танких метала дебљина $s \leq 1 \text{ mm}$ неутрални слој пролази кроз средину пресека.

Међутим, када су деформације услед савијања знатне (што је случај при савијању са релативно малим полупречником кривине), попречни пресек се упадљиво деформише и неутрални слој се помера ка притиснутој зони. Тада се његов положај може одредити помоћу тзв. коефицијента померања неутралног слоја χ , чија дефиниција произилази из:

$$\begin{aligned} \chi \cdot s &= r_n - r_u \quad ; \quad r_n = r_u + \chi \cdot s \\ \chi &= \frac{r_n - r_u}{s} \end{aligned} \quad (2)$$

(што важи за случај $b > 5s$, тј. $n=1$).

У табели 1 наведене су (према Романовском) вредности овог коефицијента за савијање под углом 90° широких делова од металног челика. Напомиње се да оне важе за

случај када се савијање врши слободно, без затезања читавог дела, а такође и без завршног калибрисања.

И из ових података се види да је померање неутралног слоја ка унутрашњој површини утолико веће, уколико је мањи однос r_u/s и да при $r_u/s > 5$ неутрални слој практично пролази кроз геометријску средину пресека.

Слични подаци могу се у различитим литературним изворима наћи и за друге материјале, углове савијања и попречне пресеке.

Неутрални слој, чији је положај одређен на овај начин, заправо је неутрални слој деформације, тј. у њему се после савијања не запајају ни издужења, ни скраћења, тако да је његов положај значај првенствено са становишта одређивања развијене дужине. Међутим, треба правити извесну разлику између њега и неутралног слоја напона у коме је нормални напон у тангенцијалном правцу $\sigma_1=0$. Полупречник кривине овог неутралног слоја одредиће се касније при анализи напонског стања. Он је мањи од полупречника неутралног слоја деформације, тј. налази се нешто ближе центру кривине. Ова неподударност положаја неутралних слојева напона и деформације проузрокована је извесним заосталим деформацијама у односу на напоне у средњој зони попречног пресека. Наиме, неутрални слој деформације се, како је већ речено, непрекидно у току процеса помера ка центру кривине, због чега ће један део материјала, који је на почетку био изложен притиску у тангенцијалном (уздужном) правцу, тј. био скраћен, касније прећи у затегнуту зону. Зато ће ти предходно скраћени делови материјала бити изложени напонима затезања још пре него што се истезањем врате на првобитну дужину (која одговара неутралном слоју деформације), па ће се наутрални слој напона наћи нешто ближе центру кривине. Ипак, најчешће се при технолошким прорачунима ова разлика може занемарити.[5]

Најзад, треба напоменути да детаљнија анализа показује да се распоред деформација у зони савијања мења и по дужини, а не само по дебљини, тако да положај неутралног слоја, строго посматрано, није исти у свим пресецима (најближи је унутрашњој површини у осном пресеку, због чега неутрална оса заправо и нема правилан лучни облик) али ове појединости обично нису од већег практичног значаја, па се њихов утицај такође занемарује.

Табела 1 - Коефицијент померања неутралног слоја x при савијању под 90° челика са око 0,10-0,22%С

r_u/s	x	r_u/s	x
0,1	0.30	1.2	0.43
0.15	0.32	1.5	0.44
0.2	0.333	1.8	0.45
0.25	0.35	2.0	0.455
0.3	0.36	2.5	0.46
0.4	0.37	3	0.47
0.5	0.38	4	0.476
0.6	0.386	5	0.48
0.7	0.40	7	0.49
0.8	0.408	10	0.50
1.0	0.42		

3.6 Одређивање димензија полазног комада - развијено стање

Ако се зна положај неутралног слоја може се одредити почетна дужина несавијеног комада, јер је тај положај и одређен на основу претпоставке да се дужина неутралног слоја при савијању не мења. Развијена дужина биће једнака збиру дужине правих (несавијених) делова (l_1) и дужине неутралног слоја (l_n) у зони савијања (слика 18).

Дужина савијеног неутралног слоја биће:

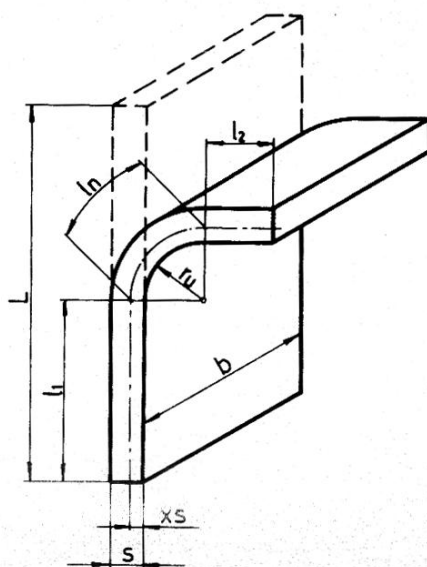
$$l_n = \frac{\pi \cdot \varphi}{180} \cdot (r_u + x \cdot s) = 0,0174 \cdot \varphi \cdot (r_u + x \cdot s) = 0,0174 \cdot \varphi \cdot s \cdot \left(\frac{r_u}{s} + x \right) \quad (3)$$

где је:

φ - угао савијене зоне у степенима, који је само при $\varphi = 90^\circ$ једнак унутрашњем углу савијања α , а иначе је $\varphi = 180 - \alpha$ (слика 19.).

За случај $\varphi = 90^\circ$ биће дужина неутралног слоја:

$$l_n = 1,57 \cdot (r_u + x \cdot s) \quad (4)$$

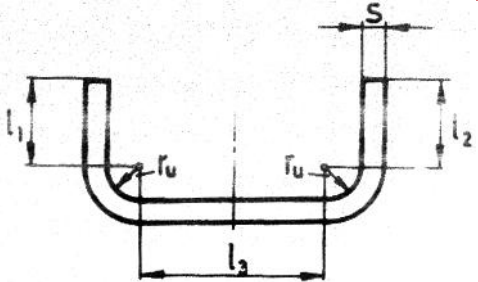
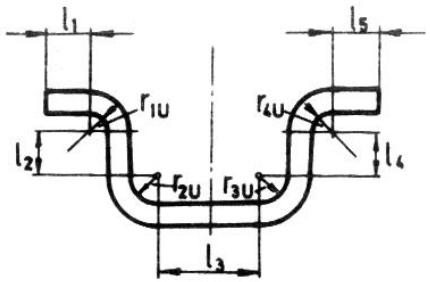
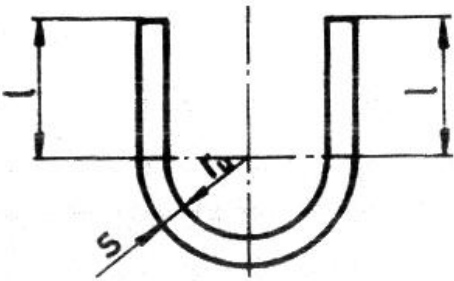
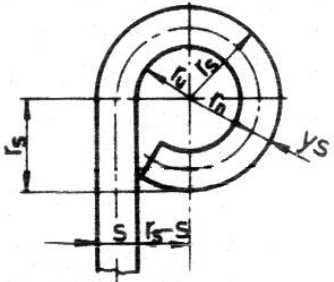


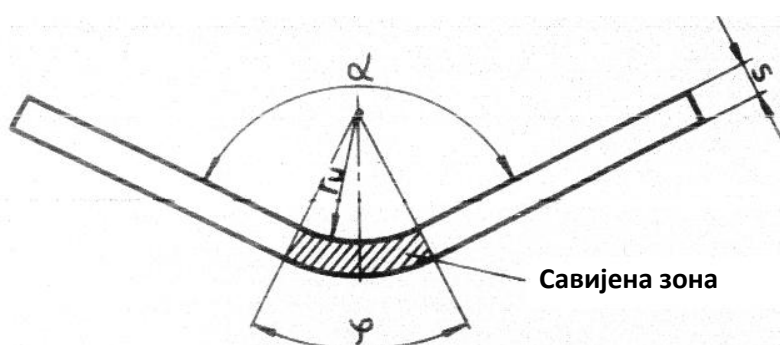
Слика 18 - Елементи развијене дужине L

За неколико типичних случајева савијања у табели 2. су наведени примери одређивања развијене дужине. Сличне табеле постоје и за друге случајеве. На пример, дужине неутралног слоја l_n могу се дати таблично за већи број случајева у зависности од полупречника савијања r_u и дебљине лима s , и на тај начин олакшати практично изналажење укупне дужине.

Табела 2 - Одређивање развијених дужина за различите случајеве савијања

Тип савијања	Скица	Развијена дужина L
Једноугаоно		$L = l_1 + l_2 + l_n =$ $= l_1 + l_2 + \frac{\pi}{2} \cdot (r_u + x \cdot s)$

Двоугаоно		$L = l_1 + l_2 + l_3 + \pi \cdot (r_u + x \cdot s)$ $= l_1 + l_2 + l_3 + 2 \cdot l_n$
Четвороугаоно (у две операције)		$L = l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 +$ $+ l_{n1} + l_{n2} + l_{n3} + l_{n4} =$ $L = l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 +$ $+ \frac{\pi}{2} \cdot (r_{1u} + x_1 \cdot s) + (r_{2u} + x_2 \cdot s) +$ $+ (r_{3u} + x_3 \cdot s) + (r_{4u} + x_4 \cdot s)$
Полукружно		$L = 2l + 2l_n = 2l + \pi \cdot (r_u + x \cdot s)$
Завијање		$L = 1,5 \cdot \pi \cdot r_n + 2r_s - s$ $r_n = r_s - y_s$



Слика 19 - Однос између угла савијене зоне φ и угла савијања α

С обзиром да се најчешће подаци за дужину неутралног слоја дају за угао савијања $\alpha = \varphi = 90^\circ$, напомиње се да је из њих могуће добити и вредности за друге углове φ - када се оне помноже са односом $\varphi/90^\circ$. Истина, при томе се, строго посматрано, прави извесна грешка, јер је коефицијент x узиман за угао савијања под 90° (за тачнији рад било би потребно располагати подацима за x за одговарајући угао савијања).

Табела 1 - Коефицијент y у зависности од односа r/s за челике са око 0,10-0,22%С (за завијене крајеве)

r/s	y
1,6	0,4
1,8	0,42
2,0	0,44
2,2	0,46
2,4	0,48
2,6	0,49
2,8	0,5
3,0	0,5
3,2	0,5

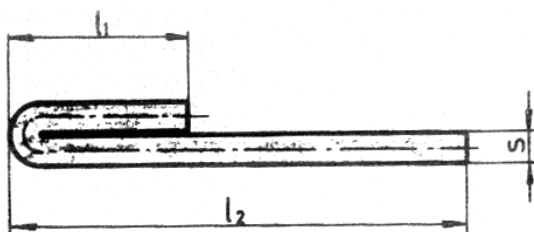
У случају да је савијање под скоро оштрим углом ($r_u < 0,3s$) и да се при томе врши још и калибрисање угла, за одређивање дужине L треба сабрати све праве делове, као и дужину савијене зоне, узимајући у обзир њено стање:

$$L = l_1 + l_2 + \dots + l_n + k \cdot s \cdot (n-1) \quad (5)$$

где је: n - број правих (несавијених) делова; $l_1, l_2, \dots, l_n$ - дужине тих правих делова; k - коефицијент чија је вредност 0,38-0,40 за случај да је полупречник заобљења притискивача $r_u = 0,5s$, а 0,45-0,48 при $r_u = 0,1s$ (мање вредности се односе на дебљине материјала $s < 1mm$, а највеће на $s = 3-4mm$).

При савијању за 180° до приљубивања кракова (слика 20) може се дужина L израчунати по обрасцу:

$$L = l_1 + l_2 - 0,43s \quad (6)$$

**Слика 20** - Савијање за 180° на приљубљеним краковима

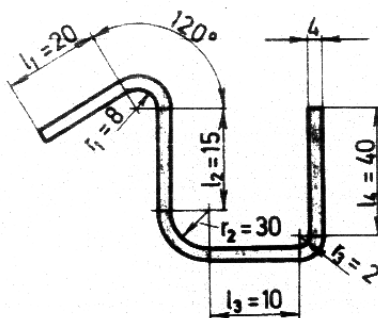
Резимирајући изложено, може се закључити да је за одређивање развијене дужине потребно:

- одредити положај неутралног слоја
- разложити профил савијеног комада на елементе - праве делове и лучне делова савијене на одговарајућим радијусима кривине;
- сабрати дужине ових елемената, при чему се дужине правих делова сабирају без промене, а савијени делови са корекцијом, с обзиром на померање неутралне осе.

Најзад, треба напоменути да се при изради сложених и одговорних делова препоручује одређивање дужине L опитом, с обзиром да неки утицајни чиниоци могу довести до извесних грешака (утицај својстава материјала, брзине деформације, конструкције алата, стања радних површина и др.). Ако се савијање врши уз завршно

калибрисање савијене зоне, онда се поготово не могу очекивати реални резултати на основу наведених образаца.

Пример: *Одредити развијену дужину дела савијеног на три места - према слици 21. Дебљина лима је $s=4\text{mm}$.*



Слика 21 - Попречни пресек савијеног дела

Решење: Укупна дужина добија се као збир дужина несавијених делова и дужина неутралних оса у савијеним зонама, тј.

$$L = l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_{n1} + l_{n2} + l_{n3} =$$

$$L = 20 + 15 + 10 + 40 + 0,0174 \cdot 120 \cdot (r_1 + x_1 \cdot s) + 0,0174 \cdot 90 \cdot (r_2 + x_2 \cdot s) + 0,0174 \cdot 90 \cdot (r_3 + x_3 \cdot s)$$

Коефицијенти померања неутралног слоја налазе се у табели и они износе:

$$x_1 = 0,455 \quad x_2 = 0,5 \quad x_3 = 0,38$$

Коначно се добија:

$$L = 85 + 0,0174 \cdot [120 \cdot (8 + 0,455 \cdot 4)] + 0,0174 \cdot 90 \cdot (30 + 0,5 \cdot 4) + 0,0174 \cdot 90 \cdot (2 + 0,38 \cdot 4)$$

$$L = 161\text{mm}$$

3.7. Минимални допуштени унутрашњи полупречник

У већини случајева при обради лима врши се савијање делова са малим полупречницима кривине. Тиме се, поред осталог, постиже и њихова већа општа крутост. Да би се омогућило успешно савијање и избегло разарање материјала у спољној затегнутој зони потребно је знати до ког се најмањег полупречника уопште може вршити савијање. Другим речима, износ овог полупречника је заправо фактор који ограничава могућност савијања. Јасно је да величина минималног полупречника зависи, како од геометријско-димензијских односа, тако и од својства материјала. Тачније речено, он зависи од: [5]

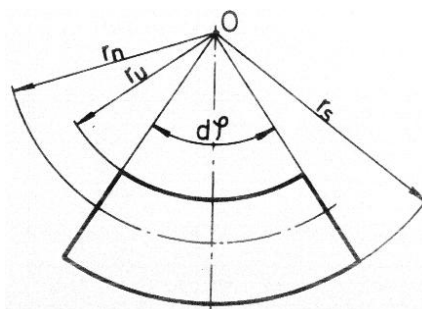
- механичких својстава материјала (мањи полупречници савијања су могући код пластичнијих материјала, тј. оних који показују веће процентуално издужење при прекиду);
- угла савијања и, у вези са тим, величина напона затезања који се јављају на спољној површини (при мањим угловима савијања минимални полупречник мора бити већи);
- положаја правца линије савијања у односу на правац ваљања материјала (пожељно је да она буде постављена попречно у односу на правац ваљања);
- стања ивица дела (да ли су обрађене и глатке, или неравне и оштећене).

Разматрање овог проблема извршиће се преко минималног унутрашњег полупречника кривине $r_{\min}$.

Фактор који ограничава могућност смањења овог полупречника јесте величина дозвољених деформација које се јављају у површинским зонама савијеног дела.

Релативна деформација (издужење) једног влакна на спољашњој савијеног површини ε_{r_s} биће, према ознакама на сл. 22.:

$$\varepsilon_{r_s} = \frac{r_s d\varphi - r_n d\varphi}{r_n d\varphi} = \frac{r_s}{r_n} - 1 \quad (7)$$



Слика 22 - Елементарни исечак савијене зоне

Напомена: пире посматрано, деформација се може изразити и као стварна (логаритамска), што је при неким другим разматрањима коректније, тј.

$$d\varphi = \frac{(r + dr)d\alpha - r d\alpha}{r d\alpha} = \frac{dr}{r}$$

$$\varphi_{r_s} = \int_{r_n}^{r_s} \frac{dr}{r} = \ln \frac{r_s}{r_n}$$

или уопште

$$\varphi = \ln \frac{r}{r_n} \quad (8)$$

Како деформација ε_{r_s} одговара релативном максималном издужењу на спољашњој површини, може се та вредност изједначити на пр. са вредношћу максималног равномерног издужења епрувете при испитивању материјала затезања и из тога добити би износ минималног полупречника. У ствари, практично мора бити задовољен услов

$$\varepsilon_{rs \max} < \varepsilon_1$$

где је ε_1 релативно издужење епрувете при прекиду добијено испитивањем затезањем.

Према неким препорукама, уместо деформације при прекиду ε_1 треба користити износ максималне равномерне деформације - остварене до тренутка почетка локализовања деформисања. То, несумњиво, даје већу сигурност, али је такође чињеница да се у многим случајевима у деловима од лима може практично допустити и извесна неравномерна деформација, без штетних последица. Стога су у погледу овог критеријума мишљења унеколико подељена што, међутим, за решавање инжењерских проблема и не мора бити од значаја, тим пре што постоје и друга решења и препоруке, као што је то у даљем приказано. Наиме, резултати теоријских анализа које су вршили различити аутори често не омогућују добијање сасвим поузданих података за практично коришћење. Неслагања која у том смислу могу настати имају своје порекло у чињеници да на износ минималног

полупречника савијања практично утичу различити чиниоци, од којих се само неки узимају у обзир при теоријским анализама.

У бројним публикацијама (приручницима и др.) могу се наћи таблични подаци о експериментално добијеним вредностима за максимална издужења различитих материјала као и други подаци потребни за изналажење минималног полупречника савијања по изложеном принципу. Не треба заборавити да се при томе, како је већ напоменуто, мора водити рачуна о положају линије савијања у односу на правац ваљања. Уколико је она у најнеповољнијем правцу (у правцу ваљања, тако да затежући уздужни напони падају попречно на влакна материјала), треба извршити корекцију односно смањење износа граничне деформације. Ово истовремено значи да треба настојати да се при савијању лим постави тако да линија савијања буде у најпогоднијем правцу (наравно то није могуће увек остварити).

Табела 4 - Минимални полупречници савијања r_{umin} (за савијање под 90°)

Материјал	Стање материјала			
	жарено или нормализовано		ојачано хладним деформисањем	
	правац линије савијања у односу на правац ваљања			
	Попречно	Дуж влакана	Попречно	Дуж влакана
	Полупречник савијања r_{umin}			
Алуминијум,			0,3s	0,8s
Жарен бакар,			1,0s	2,0s
Месинг Ms 68,	0	0,3s	0,4s	0,8s
Умирен угљ. чел. са око 0,05- 0,08%С			0,2s	0,5s
Угљени челици са 0,08-0,10%С (Ћ.0260)	0	0,4s	0,4s	0,8s
Ћ. 0360	0,1s	0,5s	0,4s	1,0s
Ћ. 0460	0,2s	0,6s	0,6s	1,2s
Ћ. 0545	0,3s	0,8s	0,8s	1,5s
Ћ. 0645	0,5s	1,0s	1,0s	1,7s
Ћ. 0745	0,7s	1,3s	1,3s	2,0s
Нерђајући челик	1,0s	2,0s	3s	4s
Дуралуминијум меки	1,0s	1,5s	1,5s	2,5s
Дуралуминијум тврд	2,0s	3,0s	3,0s	4,0s

Напомене:

1. При савијању дуж линије која је под углом од 45° у односу на правац ваљања, треба узети средње износе r_{umin} .
2. При савијању под угловима мањим од 90° треба горње вредности повећати за 1,1-1,3 пута.
3. Ако постоје оштећења површине са спољне стране, онда треба ове полупречнике узимати 1,5 - 2 пута веће.

Напомиње се да примену минималних полупречника савијања треба избегавати, тј. настојати да се остваре већи полупречници. Минимални могу доћи у обзир само у изузетним случајевима, када су заиста неопходни. Стога износи $r_{\min}$ најчешће служе само као контролне граничне вредности.

Са друге стране, услед наведених бројних утицаја чинилаца, поузданије податке о овом полупречнику, ипак, пружају резултати специјално вршених испривања. Без обзира на извесне разлике с обзиром на форму у којој се приказују ти резултати од стране различитих аутора, заједничко им је то што се заснивају на једноставној зависности минималног полупречника савијања од дебљине материјала:

$$r_{\min} = c s \quad (9)$$

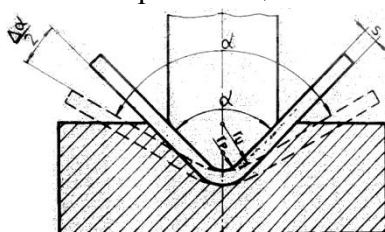
где је c коефицијент који се одређује експериментално и зависи од врсте, односно својстава, материјала.

Резултати једног оваквог испривања за различите материјале наведени су у табели 4. и могу се користити у практичне сврхе. [5]

Упоређењем резултата добијених на основу података препоручених од стране различитих аутора може се запазити да између њих постоје извесне разлике. Њихове узорке треба тражити у примени различитих критеријума, као и увођењу различитих претпоставки (на пример, изражавање максималне деформације уз претпоставку да нема померања неутралне осе, изједначавање ове деформације са износом равномерног издужења или издужења при прекиду, итд.). Осим тога, у неким препорукама (стандардима и др.) већ је узето у обзир извесно сигурносно повећање полупречника савијања, тако да се практично препоручују вредности $r_{\min}$ које су реално и нешто веће од стварних минималних износа.

3.8 Еластична повратност и највећи гранични полупречник савијања

У укупну деформацију која се остварује савијањем укључена је, поред пластичне, и еластична деформација. Штавише, у зони око неутралног слоја најчешће постоји чисто еластично деформисање. По ослобађању савијеног дела из алата ове еластичне деформације добрим делом настају, услед чега се мења (повећава се) угао савијања α , као и полупречник савијања (унутрашњи полупречник дела r_u) - слика 23. Ова појава се назива еластично исправљање или повратност. Она ће бити утолико више изражена, уколико је већи удео еластичних деформација при савијању (под истим осталим условима). Са друге стране, тај удео у највећој мери зависи од односа r_u/s . Из тога произилази да је и величина еластичног исправљања зависна, како од својстава материјала, тако и од односа r_u/s , тј. да је оно мање при савијању са релативно оштрим ивицама него са знатније заобљеним.



Слика 23 - Промена угла савијања услед еластичног исправљања

Да би се, ипак, добио радни предмет савијен под неким одређеним углом, мора се величина промене угла услед еластичног исправљања узети у обзир и угао алата изградити умањен за тај износ. Исто тако, требало би и полупречник заобљења алата (савијача) r_p изградити нешто умањен. На тај начин део тек после исправљања постиже задати угао и полупречник савијања. Међутим, при савијању са релативно великим полупречником ($r_u/s > 10$), промена полупречника савијања се обично занемарује. [5]

Начелно посматрано, угао повратности $\Delta\alpha$ може се одредити, или аналитички, или експериментално. Он, заправо, представља разлику између угла који заклапају кракови дела после еластичног исправљања (α') и угла алата (α):

$$\Delta\alpha = \alpha' - \alpha \quad (10)$$

Напомиње се да треба правити разлику између еластичног исправљања при слободном савијању и при савијању са завршним калибрисањем, јер је оно у овом другом случају знатно мање.

Угао повратности при слободном савијању зависи углавном од: еластичности материјала, његове дебљине, облика дела, степена деформације, угла савијања, врсте савијања, зазора између притискивача и матрице (односно степена калибрисања у завршној фази савијања) и др. На пример, при једноугаоном савијању повртаност ће бити већа него при двоугаоном (при истим осталим условима).

Може се дакле, сматрати да ће еластично исправљање бити утолико веће уколико је већа граница течења материјала, већи однос r_u/s и мања дебљина.

С обзиром на велики број утицајних чинилаца, као и врло разноврсне облике радних комада, није могуће теоријски формулисати сасвим поуздане и универзалне обрасце за израчунавање углова повратности. Зато се ти углови обично одређују на основу експерименталних података сврстаних у погодне табеле, дијаграме и номограме, или приближних емпиријских образаца, који се, према различитим ауторима, унеколико међусобно разликују. На слици 24. су навођени за неке челике подаци у овом смислу, који важе за случај једноугаоног савијања у затвореном алату. Уколико се не располаже оваквим дијаграмима, могу се користити различити емпиријски обрасци. На пример, према Романовском, они могу имати следећи облик: [5]

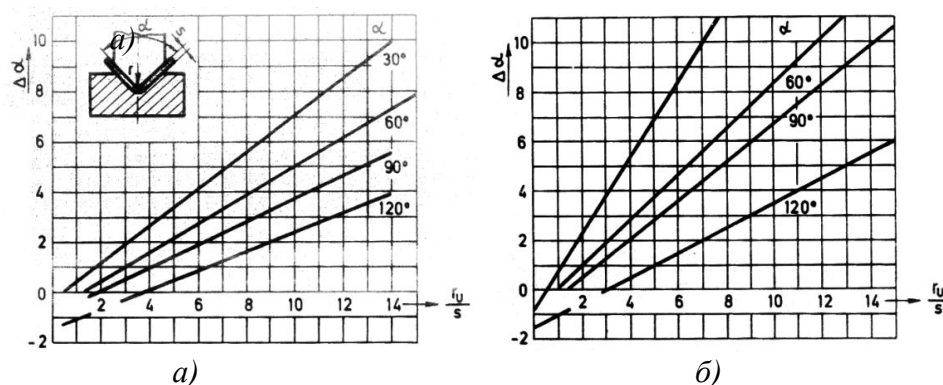
а) V - савијање (једноугаоно)

$$\text{tg}\Delta\alpha = 0,375 \cdot \frac{l}{k \cdot s} \cdot \frac{\sigma_T}{E} \quad (11)$$

б) U - савијање (двоугаоно)

$$\text{tg}\Delta\alpha = 0,75 \cdot \frac{l_1}{k \cdot s} \cdot \frac{\sigma_T}{E} \quad (12)$$

где су: $\Delta\alpha$ - угао повратности (са једне стране код двоугаоног савијања); k - коефицијент који одређује положај неутралног слоја у зависности од односа r_u/s и једнак је $k = 1 - x$; l - растојање (распон) између ивица матрице; $l_1 = r_m + r_p + 1,25s$ и представља ширину угнутог - савијеног дела (r_m - полупречник заобљења ивица матрице, r_p - полупречник заобљења ивице притискивача); E - модул еластичности; σ_T - граница развлачења (течења).



Слика 24 - Дијаграми за одређивање угла повратности при савијању: а) за мало угљеничне челике са око 0,08%С; б) за угљеничне челике са затезном чврстоћом $\sigma_M=400-600 \text{ N/mm}^2$

Б. В. Рјабин [5] је дошао на основу експерименталних података до закључка да се угао повратности $\Delta\alpha$ може одредити у зависности од релативног радијуса r_u/s и од угла савијања. На пример, за савијање под 90° меких угљеничних челика (као што је $\check{C}.0260$ и сл.) биће:

$$\Delta\alpha = 0,43 \cdot \frac{r_u}{s} - 0,61 \quad (13)$$

а за $\check{C}.0545$:

$$\Delta\alpha = 0,79 \cdot \frac{r_u}{s} - 1,62 \quad (14)$$

За угао савијања од 60° ове вредности се увећавају за око 20-25%, а за угао 120° за толико се умањују.

Одговарајући експериментални подаци постоје и за друге материјале.

Треба рећи да меки материјали као што су: бакар, алуминијум, меки месинг и сл. показују уопште мало еластично исправљање после савијања. Насупрот њима, тврђи метали се више исправљају.

Када се савијање врши са великим полупречницима кривине ($r_u/s > 10$), или када је упитању слободно полукружно савијање, треба, поред угла повратности, одредити и промену полупречника кривине услед еластичног исправљања (слика 23.). То треба тумачити чињеницом да су тада деформације у већој мери еластичне него при савијању са малим полупречницима. [5]

Полупречник заобљења врха притискивача r_p у овом случају може се одредити, на пример, по обрасцу С.К. Абрамова [5]:

$$r_p = \frac{r_u}{1 + 3 \cdot \frac{\sigma_T}{E} \cdot \frac{r_u}{s}} = \frac{1}{\frac{1}{r_u} + 3 \cdot \frac{\sigma_T}{E \cdot s}} \quad (15)$$

а угао повратности:

$$\Delta\alpha = (180 - \alpha) \cdot \left(\frac{r_u}{r_p} - 1 \right) \quad (16)$$

где ознаке имају следеће значење: r_p - полупречник заобљења притискивача; r_u - полупречник унутрашње савијене површине дела после еластичног исправљања; E - модул еластичности; σ_T - граница развлачења.

Види се да за случај да је $r_u/r_p=2$ доћи до потпуног исправљања дела, тако да при односима $r_u/r_p>2$ (тј. $r_u>>s$) не може бити трајног савијања, јер ће се остварити само еластичне деформације. С обзиром на ово, од практичног је интереса одредити највећи полупречник савијања са којим се још може остварити трајна деформација.

Релативна деформација спољашњег влакна је:

$$\varepsilon = \frac{r_s - r_n}{r_n}$$

а ако се због великог полупречника кривине (односно малог померања неутралне осе) сматра да неутрални слој пролази приближно кроз тежиште пресека, онда ће бити:

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{s}{2 \cdot r_n} \approx \frac{s}{2 \cdot r_u} \\ r_u &\approx \frac{s}{2 \cdot \varepsilon} = \frac{s \cdot E}{2 \cdot \sigma}\end{aligned}\quad (17)$$

јер се претпоставља да је у овом случају савијање само еластично, па се може применити Хуков закон: $\sigma=E\varepsilon$.

Гранични случај оваквог (еластичног) савијања ће се одредити из услова да напони у спољним влакнима буду на граници између области еластичности и пластичности, тј. $\sigma=\sigma_T$ (граница течења). Отуда произилази да ће највећи полупречник са којим се још може остварити трајно савијање бити:

$$r_{u\max} = \frac{s \cdot E}{2 \cdot \sigma_T} \quad (18)$$

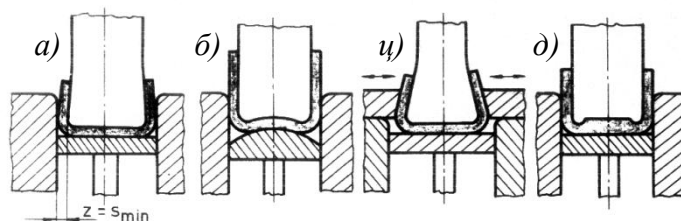
То такође значи да се унутрашњи полупречник савијеног дела r_u (онај који се налази на конструкционом цртежу) мора налазити у опсегу:

$$r_{u\min} < r_u < r_{u\max}$$

Уколико је савијање са јаким завршним сабијањем (калибрисањем), угао повратности се свакако мора установити непосредним опитом, јер он тада не зависи само од односа $r_u>>s$, већ и од степена сабијања, као и подешености пресе. Уопште се може рећи да је у овом случају повратност мања него при слободном савијању. Штавише, при савијању са јаким калибрисањем завршним ударом и при релативно малом полупречнику ($r_u>s<0,2-0,3$) може евентуално доћи и до извесног смањења угла α (супротно од повратности).

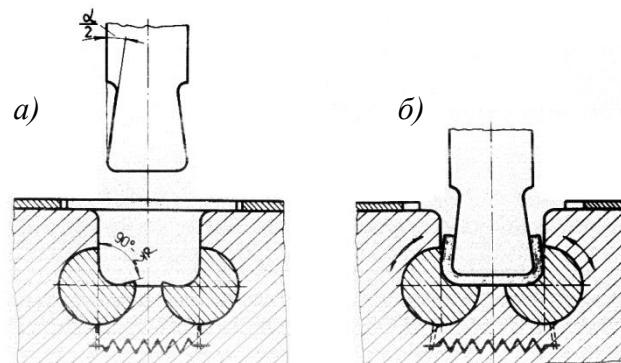
Напред је речено да се при једноугаоном савијању мора повратност узети у обзир на тај начин што ће се смањити угао алата за износ угла повратности. [5]

Код двоугаоног савијања понекад је погодније израдити притискивач са супротним бочним угловима који одговарају угловима повратности (слика 25.а), или се чела извлакача и држача лима израђују са заобљењима (слика 25.б). Такође се у неким случајевима предвиђа алат са бочним покретним притискивачем (с), или се врши утискивање материјала ма угловима и тиме спречава повратност (д).



Слика 25 - Различите могућности за компензацију угла повратности

Једно од оригиналних решења конструкције алата са остварењем принципа компензације који одговара случају в) на слици 25. приказан је шематски на слици 26.



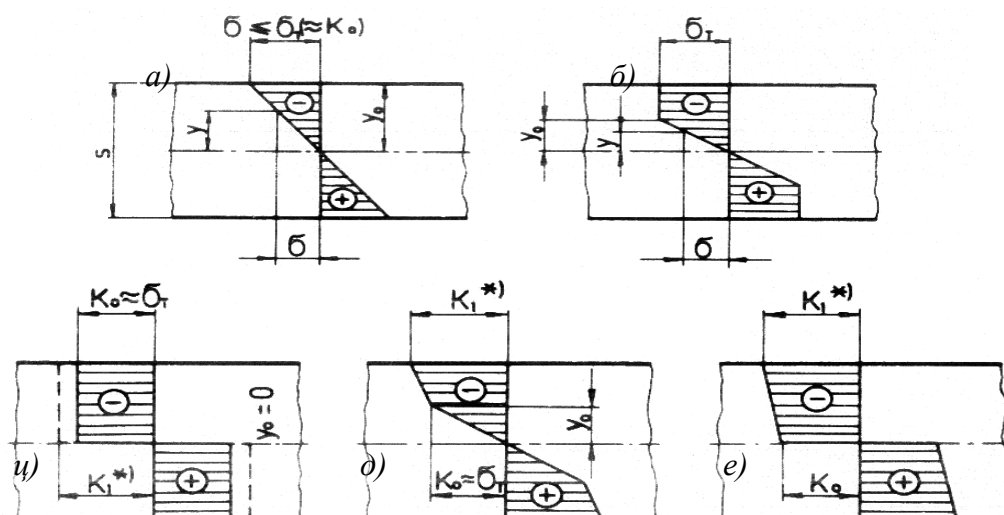
Слика 26 - Једна од могућности за бочно повијање кракова угаоника у циљу корекције углова услед повратности

3.9 Напони у зони савијања

Видеће се из даљег да је од највећег значаја познавање величине и распореда напона у критичном пресеку дела који се савија.

С обзиром на врсту и распоред нормалних напона по висини тог попречног пресека, разликоваће се неколико типичних случајева. При томе је погодно да се најпре посматрају само напони у тангенцијалном (тј. уздужном) правцу σ_t . Ови случајеви су шематски приказани на слици 27. Поједине скице на овој скици односе се на следеће случајеве савијања (типичне, с обзиром на врсту напона): [5]

- еластично савијање;
- еластично-пластично савијање;
- чисто пластично савијање без деформационог ојачања (напон σ_T се овде односи на случај свођења еластично-пластичног савијања на чисто пластично - ради упрошћавања, а K на случај када практично постоји чисто пластично савијање);
- еластично-пластично савијање са ојачањем;
- чисто пластично савијање са ојачањем (у задња два случаја је стварни распоред напона замењен праволинијским).



σ_0 - деформациони отпор на почетку пластичног деформисања ($\varepsilon \approx 0$)

K_1 - највећи деформациони отпор (при $\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_{\max} \approx s/2r_n$)

Слика 27 - Шематски приказ упрошћеног распореда нормалних напона у тангенцијалном (уздужном) правцу $\sigma_T(=\sigma_1)$ по дебљини савијеног дела

У првом случају (а) напони су по целом пресеку у области еластичности и њихова величина је пропорционална растојању у од неутралне осе (савијање је само еластично).

У другом случају (б) напони су у средњој зони такође у области еластичности, а у спољним зонама, удаљеним најмање за y_0 од неутралне осе, одговарају области пластичности. Занемарујући хладно деформационо ојачавање материјала, напони у овим пластично деформисаним зонама биће приближно једнаки граници течења (σ_T). [5]

Строго посматрано, занемаривање ојачавања оправдано је само у случају топлог деформисања - када је деформациони отпор приближно константан, о чему ће касније бити још речи.

Даље, може се замислити да ће се при оштријем савијању пластично деформисане зоне проширити толико да испуне читав пресек ($y_0=0$), тако да савијање постаје чисто пластично, као што је приказано на слици 27.ц.

Међутим, деформационо ојачавање при пластичном деформисању у хладном стању реално постоји, због чега ће за случај еластично-пластичног савијања напон у пластичном подручју расти од почетног износа $K_0 \approx \sigma_T$ (на растојању y_0 од неутралне осе) до максималне вредности K_1 која одговара деформацији влакана на спољним површинама (д). На слици 27. ова промена напона приказана упрошћено као линеарна, мада је она у стварности криволинијска.

Најзад, у случају чистог пластичног савијања и при узимању у обзир ојачавање материјала (е), напон се мења од почетних износа K_0 на неутралној осе, до максималних K_1 у спољним влакнима.

Напомена: На слици 27. ови случајеви су приказни графички уз претпоставку да нема померања неутралне осе. Видеће се у даљем да се ова претпоставка практично не може увек прихватити. Међутим, у овом почетном приказу циљ је само да се укаже на опште могућности распореда напона по пресеку, без обзира на положај неутралне осе.

На основу досадашњег разматрања може се закључити да је основни фактор који утиче на настајање једног од ових типичних распореда и величине нормалних напона-

релативна величина полупречника савијања, тј. однос r_u/s . Када је овај однос довољно велики, савијање ће бити само еластично, а са његовим смањењем оно ће прећи у еластично-пластично подручје и најзад у чисто пластично.

Мада је распоред нормалних уздужних напона према слици 27.д најопштији при савијању у хладном стању, ипак се може за релативно мале односе r_u/s занемарити подручје еластичности (сматрати да је $y_o \approx 0$) и проблем свести на чисто пластично савијање. Колико је оваква претпоставка оправдана може се проценити из података да је случај $r_u/s=2$ полудебљина зоне еластичности $y_o \approx 1\%$ од дебљине лима s . Зато се практично предња претпоставка проширује на све односе $r_u/s < 5$, тј. условно сматра да тада не постоји подручје еластичних деформација, односно напона, већ да се напони по читавом пресеку налазе у области пластичности.[5]

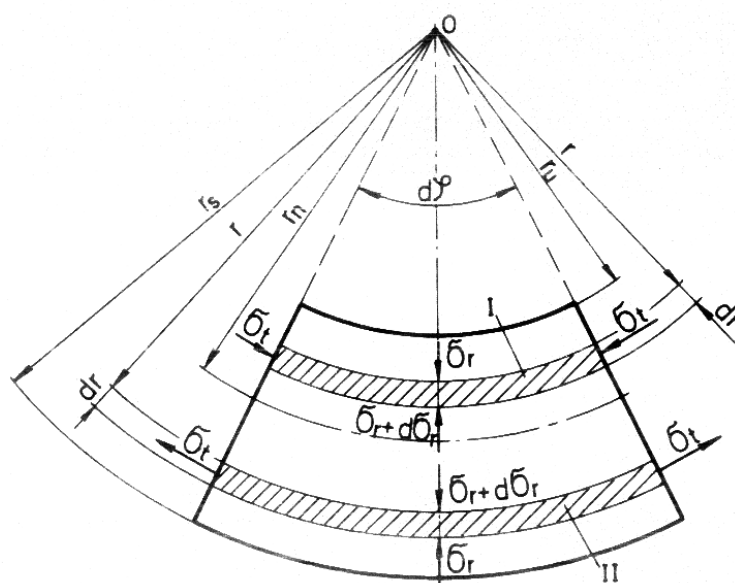
Раније је речено да, поред нормалних уздужних напона који делују дуж савијених влакана, у савијеној зони делују управно на њих и радијални напони $\sigma_r(\sigma_3)$. Из израза за њих (касније ће бити изведен) произилази да ће, на пример, при $r_u/s=5$ у неутралном слоју бити $|\sigma_r| \approx 0,1K$, што је уједно и највећа вредност овог напона, па се може сматрати да је $\sigma_r \approx K$. У таквим условима ($r_u/s > 5$) може се узети да је приближно $r_n \approx r_u + s/2$, тј. да се неутрална оса са геометријском, што, дакле, значи да је утицај σ_r на σ_t , и уопште напонско стање, занемарљиво мали. Међутим, за $r_u/s < 5$ утицај σ_r је знатнији и неутрална оса се помера ка зони притиска, утолико више, уколико је овај однос мањи.

Из овог разлога биће погодно да се одвојено размотре случајеви који се могу свести на чисто пластично савијање и они који се морају посматрати као еластично-пластично савијање.

3.9.1 Напони при чистом пластичном савијању

На основу предњих закључака, сматраће се да је практично за све случајеве $r_u/s < 5$ савијање чисто пластично.

За аналитичко изналажење нормалних напона поставиће се најпре једначина равнотеже за један елементарни слој исечка савијене зоне дела, према слици 28. Пгодно је при томе користити поларне координате σ_t , σ_r и σ_b односно $\sigma_t = \sigma_1$; $\sigma_b = \sigma_2$; $\sigma_r = \sigma_3$ јер су σ_t , σ_r и σ_b главни нормални напони.



Слика 28 - Шематски приказ напона који делују на елементарне слојеве савијене зоне

Према претходном разматрању, при чисто пластичном савијању, услед настајања релативно велике ("оштре") кривине, приметно се сабијају поједини слојеви материјала у радијалном правцу (у правцу дебљине лима), тако да се појављују знатни радијални притискујући напони σ_r , који се не могу једноставно занемарити. Они су највећи на неутралном слоју и сматрају се до нуле на спољним површинама (слика 29.).

Ако се претпостави довољно велика ширина ($b > 5s$), онда ће се проблем свести на раванско деформационо стање ($\varepsilon_b = \varepsilon_2 \approx 0$). Према теорији пластичности, у том случају мора бити:

$$\sigma_b = \frac{\sigma_t + \sigma_r}{2} \quad (19)$$

што је уједно вредност средњег главног напона.

За постављање диференцијалне једначине равнотеже једног од означених елементарних слојева (I или II) учиниће се, ради једноставнијег испитивања израза, још и претпоставка да је $b=1$ (касније ће се у израз лако укључити стварна ширина b), па ће бити, на пример за слој I, сума сила које делују у радијалном правцу:

$$\sigma_r r d\varphi - (\sigma_r + d\sigma_r) \cdot (r + dr) d\varphi + 2\sigma_t dr \sin \frac{d\varphi}{2} = 0$$

Може се узети да је $\sin \frac{d\varphi}{2} = \frac{d\varphi}{2}$ и $d\sigma_r dr \approx 0$ (као бесконачно мала величина вишег реда). На тај начин се добија тражена диференцијална једначина равнотеже у облику:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_t}{r} = 0 \quad (20)$$

Енергетски услов пластичности изражен на упрошћен начин за овај случај биће:

$$\sigma_t - \sigma_r = \pm \beta K \quad (21)$$

јер су σ_t и σ_r овде екстремни главни напони, док је σ_b средњи (у зони затезања: $+\sigma_t = \sigma_{\max}$ и $-\sigma_r = \sigma_{\min}$, а у зони притиска: $\sigma_r = \sigma_{\max}$ и $-\sigma_t = \sigma_{\min}$).

У овој једначини се знак $+$ односи на затегнуту зону ($r > r_n$) а $-$ на притиснуту ($r < r_n$). Коефицијент β за случај овде претпостављене релативно велике ширине, тј. приближно раванског деформационог стања, износи $\beta \approx 1,15$.

Заједничким решавањем предње две једначине и одређивање интеграционе константе из граничних услова, према којима је за затегнуту зону $\sigma_r = 0$ на спољашњој површини ($r = r_s$), а за притиснуту такође $\sigma_r = 0$ на унутрашњој површини ($r = r_u$), добијају се изрази за напоне у зони затезања и зони притиска.

а) За зону затезања:

$$\sigma_t - \sigma_r = \beta K$$

$$\sigma_r - \sigma_t = -\beta K, \text{ односно}$$

Заменом ове вредности у диференцијалној једначини добија се:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\beta K}{r} = 0 \quad (22a)$$

$$\sigma_r = \beta \int_{r_s}^r K \frac{dr}{r} = -\beta \int_r^{r_s} K \frac{dr}{r} \quad (22b)$$

(σ_r расте идући од спољне површине ка неутралној оси)

Претпоставиће се, за сада, да је деформациони отпор K константан (што значи да нема ојачања, или да је његова стварна променљива вредност замењена неком средњом константном вредношћу). У том случају биће израз за радијални напон у зони затезања:

$$\sigma_r = -\beta K \cdot \ln \frac{r_s}{r} \quad (23)$$

а напон у тангенцијалном правцу:

$$\sigma_t = \sigma_r + \beta K = \beta K \cdot \left(1 - \ln \frac{r_s}{r}\right) \quad (24)$$

Види се да су за спољну површину ($r=r_s$) гранични услови: $\sigma_r=0$ и $\sigma_t=\beta K$, а за неутрални слој ($r=r_n$):

$$\sigma_{rn} = -\beta K \cdot \ln \frac{r_s}{r} \quad \text{и} \quad (25)$$

$$\sigma_{tn} = \beta K \cdot \left(1 - \ln \frac{r_s}{r}\right) = \beta K + \sigma_{rn} \quad (26)$$

Напомиње се да овде под r_n треба подразумевати полупречнике неутралног напонског слоја који се, према ранијем објашњењу, унеколико разликује од деформационог неутралног слоја. Међутим, те разлике практично нису велике и зато се овде могу занемарити, па је и полупречник напонског неутралног слоја обележен истом ознаком r_n која важи за деформациони неутрални слој.

b) За зону притиска:

$$\sigma_t - \sigma_r = -\beta K, \text{ односно}$$

$$\sigma_r - \sigma_t = \beta K$$

па се на аналоган начин добија

$$\sigma_r = -\beta K \cdot \ln \frac{r}{r_u} \quad (27)$$

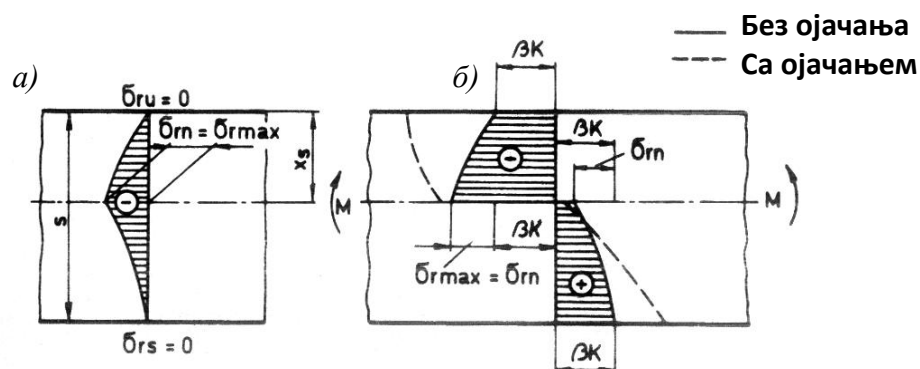
$$\sigma_t = -\beta K \cdot \left(1 + \ln \frac{r}{r_u}\right) = -\beta K + \sigma_r \quad (28)$$

Овде су гранични услови за унутрашњу површину: $\sigma_r=0$ и $\sigma_t=-\beta K$, а за неутрални слој ($r=r_n$):

$$\sigma_{rn} = -\beta K \cdot \ln \frac{r_n}{r_u} \quad \text{и} \quad (29)$$

$$\sigma_{tn} = -\beta K \cdot \left(1 - \ln \frac{r_n}{r_u}\right) \quad (30)$$

Шематски приказ промене радијалних и уздужних напона по дебљини савијеног дела дат је на слици 29. Види се да је дијаграм напона у уздужном (тангенцијалном) правцу σ_t унеколико различит од упрошћеног дијаграма на слици 27.e. Наиме, овде су узете у обзир и промене овог напона услед утицаја радијалног напона, што нарочито долази до изражаја у области неутралног слоја. Такође је уместо граничне вредности K_1 овде уведена вредност βK , а промена напона по дебљини приказана реалније - криволинијски. Она, наиме, мора бити криволинијска и под претпоставком да нема ојачања - због утицаја σ_r . Даље, овде долази и до померања неутралне осе ка притиснутој зони.



Слика 29 - Распоред радијалних (а) и уздужних (б) напона по дебљини савијеног дела за случај чисто пластичног савијања

С обзиром да је при извођењу горњих једначина коришћена константна вредност за деформациони отпор K , није било тешко аналитички интегрисати добијену диференцијалну једначину. Строго посматрано, то је оправдано само за случај савијања у топлом стању, када се деформациони отпор практично не мења са променом степена деформације. Видеће се касније да се непроменљивост деформационог отпора може условно без веће грешке претпоставити и при савијању у хладном стању, али се ти случајеви односе на веће релативне полупречнике (при чему савијање и није чисто пластично). Међутим, овде би у једначину требало уврстити стварну променљиву вредност за K уколико се жели добијање тачнијих резултата. Другим речима, деформациони отпор би требало изразити у функцији деформације, односно полупречника r . Познато је да постоји већи број различитих могућности за формирање аналитичких израза за ову функцију. Најједноставније је (мада и најмање тачно) ако се она изрази у линеарном облику као:

$$K = K_0 + M\varepsilon_t \quad (31)$$

где је K_0 - деформациони отпор (граница течења) на почетку пластичног деформисања, а M - константа која представља модул ојачања материјала.

Ако је релативна деформација у тангенцијалном правцу:

$$\varepsilon_t = \frac{r - r_n}{r_n} \text{ за зону затезања и}$$

$$\varepsilon_t = \frac{r_n - r}{r_n} \text{ за зону притиска,}$$

биће деформациони отпор за зону затезања:

$$K = K_0 + M \frac{r - r_n}{r_n} = K_0 + M \left(\frac{r}{r_n} - 1 \right) \quad (32)$$

а за зону притиска:

$$K = K_0 + M \left(1 - \frac{r}{r_n} \right) \quad (33)$$

Уврстивши овај израз у изведену диференцијалну једначину добија се, на пример, за зону притиска:

$$r \frac{d\sigma_r}{dr} = -\beta \left[K_0 + M \left(1 - \frac{r}{r_n} \right) \right]$$

После интегрисања и одређивање константе из услова да је $\sigma_r=0$ за $r=r_u$ добијају се изрази за радијални и уздужни напон у зони притиска који укључују и деформационо ојачавање:

$$\sigma_r = -\beta \left[(Ko + M) \ln \frac{r}{r_u} - M \frac{r - r_u}{r_n} \right] \quad (34)$$

$$\sigma_t = -\beta \left[(Ko + M) \left(1 + \ln \frac{r}{r_u} \right) - M \frac{2r - r_u}{r_n} \right] \quad (35)$$

а за зону затезања добија се на аналоган начин:

$$\sigma_r = -\beta \left[(Ko + M) \ln \frac{r_s}{r} - M \cdot r_n \frac{r_s - r}{r_s^r} \right] \quad (36)$$

$$\sigma_t = -\beta \left[(Ko + M) \left(1 - \ln \frac{r_s}{r} \right) - M \frac{r_n}{r_s} \right] \quad (37)$$

Евентуални увођењем других изрази за деформациони отпор добијају се после интегрисања такође одговарајући изрази за радијално и тангенцијално управљене нормалне напоне.

Међутим, то је за практичну примену, ипак, сложен поступак и зато се често користи средњи деформациони отпор K који се замењује стварна променљива вредност K :

$$K = \frac{Ko + K_1}{2} \quad (38)$$

где је Ko - деформациони отпор на почетку пластичног деформисања ($\varepsilon_0=0$), а K_1 - деформациони отпор за највећу деформацију тј. за

$$\varepsilon_1 = \frac{r_s - r_n}{r_s} \quad (\text{или } \varphi_1 = \ln \frac{r_s}{r_n})$$

3.9.2 Положај неутралног напонског слоја

Напред је наглашено да се положаји напонског и деформационог слоја међусобно не поклапају.

Изједначајући изразе за радијалне напоне у зонама притиска и затезања при $r=r_{n\sigma}$ добија се израз за полупречник $r_{n\sigma}$ који одређује положај неутралног напонског слоја:

$$-\beta K \cdot \ln \frac{r_s}{r_{n\sigma}} = -\beta K \cdot \ln \frac{r_{n\sigma}}{r_u}$$

одакле је:

$$r_{n\sigma} = \sqrt{r_s \cdot r_u} \quad (39)$$

Није тешко одавде закључити да се ни стварна неутрална напонска оса не поклапа са геометријском, већ да је и она померена ка унутрашњој страни и то утолико више уколико је мањи однос r_u/s . Исти израз за $r_{n\sigma}$ се добија и када се изједначе обрасци за радијалне напоне у којима је узето у обзир ојачавање, што показује да положај неутралног напонског слоја зависи само од димензијских односа, а не и од степена оствареног ојачања. [5]

Ипак, без обзира на ову разлику, најчешће се она занемарује, тј. користи се само један полупречник неутралног слоја r_n .

3.9.3 Напони при еластично-пластичном савијању

На основу претходног разматрања произилази да се практично може сматрати да се еластично-пластично савијање врши онда када је $r_u/s > 5$. Када је већ напоменуто, могуће је експериментално доказати да при оваквим односима величина радијалног напона неће прећи 10% од вредности деформационог отпора K , тј.:

$$|\sigma_r| \leq 0,1K \quad (40)$$

тако да је у тим случајевима углавном оправдано његово занемаривање. То значи да се тада може без веће грешке сматрати да на величину уздужног отпора σ_t радијални напон σ_r практично не утиче. Раније је већ истакнуто да се при еластично-пластичном савијању занемарује и померање неутралне осе. Са друге стране, у овом случају је дебљина зоне еластичности већа, јер y_0 уопште расте са повећањем односа r_u/s , а уздужни напон у њој су променљиви и мањи од границе течења, тј. $\sigma < \sigma_T$. Ипак, при нормалним односима у току савијања ($5 < r_u/s < 200$) ова зона еластичности се може практично занемарити и сматрати да су по читавом пресеку уздужни напони приближно константни и да су једнаки граници течења материјала. То значи да се, осим занемаривања подручја еластичности, такође занемарује и деформационо ојачавање, као релативно мало (с обзиром на мале пластичне деформације које при оваквим односима уопште могу бити остварене). [5]

Треба, међутим, рећи да се при неким детаљним анализама зона еластичности не занемарује, већ се обично у зони пластичности само занемарује утицај ојачавања материјала и сматра да је ту напон на свим местима једнак граници течења.

3.10 Моменти и силе савијања

Момент савијања (M) који настаје под дејством спољних сила мора стајати у равнотежи са моментом унутрашњих сила (M_σ) - у даљем унутрашњи момент:

$$M = M_\sigma \quad (41)$$

Спољни момент се одређује на основу положаја свих спољних сила које у току савијања делују на радни предмет. Једначине равнотеже ових сила, односно момената, постављају се на основу принципа познатих у статисти. Изједначавајући овако добијени израз за момент савијања са изразом за унутрашњи момент, добија се једначина из које се може наћи одговарајућа сила, односно уопште одредити машина на којој ће се вршити савијање.

3.10.1 Моменти унутрашњих сила при еластично - пластичном савијању

Унутрашњи момент савијања за овај случај може се представити као збир момената за зоне еластичности и пластичности, при чему је дебљина зоне еластичности $2y_0$. Према слици 27.6) биће напони у зони еластичности променљиви (обележени су са σ), а у зони пластичности стални (упрошћена претпоставка) и и једнаки граници течења R_p . Осим тога, речено је да се за $r_u/s > 5$ може без веће грешке сматрати да неутрална оса пролази кроз тежиште пресека, па ће бити:

$$M_\sigma = 2 \int_0^{y_0} y \sigma dA + 2\sigma_T \int_{y_0}^{s/2} y dA \quad (42)$$

у подручју еластичности постоји пропорција

$$\frac{\sigma}{R_p} = \frac{y}{y_o}; \sigma = \sigma_T \cdot \frac{y}{y_o}$$

из чега произилази

$$M_\sigma = R_p \cdot \left[\frac{2}{y_o} \int_0^{y_o} y^2 dA + 2 \int_{y_o}^{s/2} y dA \right]$$

Први члан у загради представља отпорни момент (W) еластично деформисаног дела пресека у односу на осу читавог пресека, тј.:

$$W = \frac{2}{y_o} \int_0^{y_o} y^2 dA = \frac{2}{y_o} \cdot I$$

где је I - аксијални момент инерције.

Други члан у загради је статички момент (Wp) пластично деформисаног дела пресека (чија је висина s - 2y_o) у односу на осу:

$$W_p = 2 \int_{y_o}^{s/2} y dA$$

тако да је унутрашњи момент савијања:

$$M_\sigma = R_p \cdot (W + W_p) \quad (43)$$

Израз у загради се може условно замислити и као еластично-пластични отпорни момент. За правоугаоне пресеке биће:

$$W = \frac{2}{3} b y_o^2 \text{ и}$$

$$W_p = b \left(\frac{s^2}{4} - y_o^2 \right)$$

па је у том најчешћем случају момент унутрашњих сила:

$$M_\sigma = R_p \cdot b \cdot \left(\frac{s^2}{4} - \frac{y_o^2}{3} \right) \quad (44)$$

Овај израз се може још изменити у том смислу што ће се y_o заменити погоднијим познатим вредностима. Наиме, по дефиницији је y=r-r_n, па је релативна деформација неког елемента влакна:

$$\varepsilon = \frac{r - r_n}{r_n} = \frac{y}{r_n}$$

а на месту преласка из зоне еластичности у зону пластичности:

$$\varepsilon_o = \frac{y_o}{r_n}$$

У језгру ограниченом висином 2y_o, због постојања само еластичних напона, важиће Хуков закон, односно:

$$R_p = E \cdot \varepsilon_o$$

из чега произилази

$$y_o = \varepsilon_o \cdot r_n = \frac{R_p \cdot r_n}{E}$$

што се може унети у једначину за момент и коначно добити:

$$M_{\sigma} = \frac{R_p b}{12} \cdot \left[3s^2 - \left(\frac{2R_p r_n}{E} \right)^2 \right] \quad (45)$$

Лако се може уочити да је утицај другог члана у загради релативно мали у највећем броју случајева и зато је најчешће оправдано да се он занемари. Он би евентуално имао практичног значаја само у случају релативно великих полупречника савијања, тј. приметнијег приближавања еластичном савијању. Тиме се, заправо, проблем своди на раније поменути претпоставку да у целом попречном пресеку постоје само пластичне деформације исте величине, односно сматра се да је уздужни напон по читавом пресеку приближно константан и да износи $R_p(y_0=0)$, тј.: [5]

$$M_{\sigma} = R_p \frac{b \cdot s^2}{4} \quad (46)$$

Ако је, међутим, $y_0=s/2$ онда је цео пресек еластично деформисан и тада је $W_p=0$ и:

$$W = \frac{b \cdot s^2}{6} \text{ па је}$$

$$M_{\sigma} = R_p \cdot W$$

што је познато из отпорности материјала.

Како се, дакле, практично и при разматрању еластично пластичног савијања проблем своди на чисто пластично савијање са константним напоном по читавом пресеку (σ_T), корисно је приметити да је однос између отпорног момента целог попречног пресека W и статичког момента пластично деформисаног целог пресека W_p , за правоугаони облик, следећи:

$$W_p = 1,5W$$

Зато се за случај еластично-пластичног савијања може дефинитивно написати:

$$M_{\sigma} = W_p \cdot R_p = 1,5W \cdot R_p \quad (47)$$

3.10.2 Моменти унутрашњих сила при чисто пластичном савијању

При овом савијању ($r_u/s < 5$) момент унутрашњих сила, односно напона σ_t , може се одредити на центар кривине:

$$M_{\sigma} = \left(\int_{r_n}^{r_s} \sigma_t r dr + \int_{r_u}^{r_n} \sigma_t r dr \right) b \quad (48)$$

где први интеграл одређују момент унутрашњих напона у зони затезања, а други у зони притиска.

Када се овде уврсти раније изведени израз за σ_t (за затезање, односно притисак) и затим изврши интегрисање у наведеним границама, добија се следећи израз за унутрашњи момент чисто пластичног савијања (за случај да нема деформационог ојачања).

$$M_{\sigma} = \beta K b \left(\frac{r_n^2}{2} \ln \frac{r_s \cdot r_u}{r_n^2} + \frac{r_s^2 - 2r_n^2 + r_u^2}{4} \right)$$

Замењујући радијус неутралног напонског слоја r_n ($=r_{n0}$) са његовом правом вредношћу $\sqrt{r_u \cdot r_s}$ добија се коначан облик израза за момент:

$$M_{\sigma} = \beta k \frac{b \cdot s^2}{4} \quad (49)$$

Ако се жели да узме у обзир стварни утицај ојачавања које се јавља при савијању у хладном стању, онда у израз за момент треба уврстити променљиве вредности за σ_t (односно K), као што је напред већ објашњено. У том случају се добија реалнија вредност за момент, јер се узима у обзир стварни напони.

Међутим, овако компликовано изналажење се најчешће избегава и утицај хладног ојачања обухвата преко једног једноставног коефицијента (n), а уместо βK практично се уводи затезна чврстоћа материјала (σ_M), тако да се добија: [5]

$$M_{\sigma} = n R_M \frac{b \cdot s^2}{4} \quad (50)$$

где се корекциони фактор ојачања креће у границама $n=1.6-1.8$ (обично се узима $n=1.8$).

С обзиром на отпорни момент еластично деформисаног пресека (W), односно статички момент пластично деформисаног пресека (W_p), биће за правоугаони пресек:

$$M_{\sigma} = n W_p R_M = 1,5 n W R_M \quad (51)$$

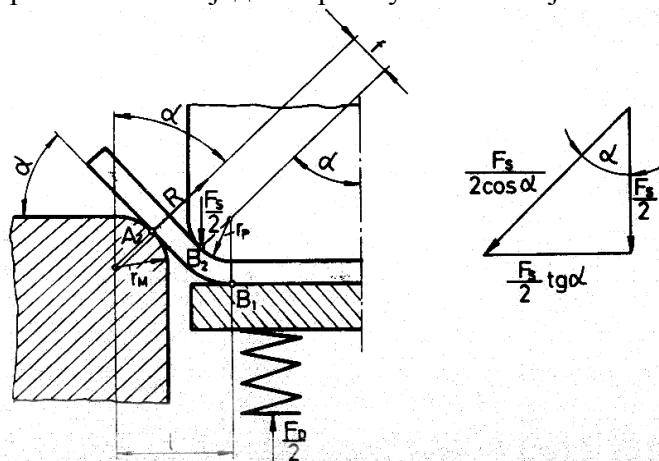
Упоређујући добијени израз за M_0 са одговарајућим изразима за еластично-пластично савијање, може се закључити да је за чисто пластично савијање потребан већи момент, што је и разумљиво ако се има у виду да у овом случају долази до читавог пресека до деформационог ојачавања, односно пораста деформационог отпора, као и уопште остварења већих пластичних деформација.

3.11 Одређивање деформационе силе при савијању у алату

Најкарактеристичнији случајеви савијања у алату су двоугаоно и једноугаоно савијање.

3.11.1 Деформациона сила при двоугаоном савијању

За избор одговарајуће машине (пресе) меродавна је максимална сила која се јавља у току процеса савијања. Стога се она, строго посматрано, не може израчунати на основу односа који постоје на почетку или на крају савијања, већ на основу односа у критичном тренутку процеса. Да би се они одредили, потребно је извести израз за момент савијања спољних сила M у функцији угла савијања. При томе се могу користити ознаке према слици 30., на којој је приказана само једна страна угаоника који се савија.



Слика 30 - Спољне силе и места њиховог деловања у неком тренутку савијања

Момент је одређен, како величином компонената сила које у додирним тачкама делују управно на лим, тако и у њиховим растојањем (краком) f .

Може се замислити да је сила $F_s/2$ једна компонента укупне силе савијања F_s која делује управно на лим. Место деловања ове компоненте је тачка B_2 која се налази на месту преласка заобљеног дела лима у праволинијски (односно, то је почетно место додира притискивача и лима, које је у почетном стадијуму савијања одговарало тачки B_1). На основу тога биће:

$$\frac{F_s}{2 \cos \alpha} = \sqrt{\left(\frac{F_s}{2}\right)^2 + \left(\frac{F_s}{2} \operatorname{tg} \alpha\right)^2} = \frac{F_s}{2} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}$$

Сила исте величине али супротног смера јавља се у тачки ослањања лима на заобљење матрице (A_2):

$$R = \frac{F_s}{2 \cos \alpha}$$

тако да се ствара спрег спољних сила:

$$M = R \cdot f = \frac{F_s}{2 \cos \alpha} \cdot f$$

Са слике 30. даље произилази да је:

$$l = r_M + r_p + s$$

а такође је и

$$\begin{aligned} l &= r_p \cdot \sin \alpha + s \cdot \sin \alpha + f \cdot \cos \alpha + r_M \cdot \sin \alpha = \\ &= (r_p + r_M + s) \cdot \sin \alpha + f \cdot \cos \alpha \end{aligned}$$

па се из ове једначине за l добија крак f :

$$f = \frac{1 - \sin \alpha}{\cos \alpha} \cdot l$$

Према томе, може се писати за момент:

$$M = \frac{F_s}{2 \cos \alpha} \cdot f = \frac{F_s}{2 \cos \alpha} \cdot \frac{1 - \sin \alpha}{\cos \alpha} \cdot l = \frac{F_s}{2} \cdot l \cdot \frac{1 - \sin \alpha}{1 - \sin^2 \alpha} = \frac{F_s}{2} \cdot l \cdot \frac{1}{1 + \sin \alpha} \quad (52)$$

Из овога се може изразити сила слободног савијања двостраног угаоника у општем облику као:

$$F_s = \frac{2M}{l} (1 + \sin \alpha) \quad (53)$$

за $\alpha = \pi/2$ било би $F_s = 4M/l$

Међутим, максимална сила, с обзиром на трење и геометријске односе, практично не настаје при достизању угла од 90° , већ знатно раније (при критичном углу $\alpha_k = 45-80^\circ$). Зато се у обрасце за практично коришћење уводе погодни чланови чија се вредност одређује експериментално за поједине случајеве.

Према Романовском, однос између максималне силе савијања и момента може се представити у облику:

$$F_{sm} = \frac{2M}{l'} \quad (54)$$

где је $l' = r_p + 1,25s$

(дакле, смањењем члана у именитељу надокнађено је елиминисањем члана $\sin \alpha_k$).

Момент спољних сила M треба овде заменити напред изведеним изразом за момент унутрашњих сила при чисто пластичном савијању:

$$M = M_{\sigma} = \frac{b \cdot s^2}{4} \cdot R_M \cdot n \quad (55)$$

Коначно се добија израз за практично израчунавање највеће силе савијања (без завршног калибрисања), узимајући у обзир и трење:

$$F_{sm} = 2bsR_M k_2 \quad (56)$$

где је k_2 - коефицијент који се одређује експериментално за различите материјале у зависности од односа r_M/s и r_p/s (индекс 2 указује на двоугаоно савијање). За меке угљеничне челике са око 0,08-0,22%С подаци о максималним износима k_2 су дати у табели 5.

Табела 5 - Коефицијент k_2 за двоугаоно савијање

r_M/s	Вредност коефицијента k_2 при $r_u/s=r_p/s$				
	0,5	1	2	3	5
1	0,27	0,21	0,16	0,13	-
2	0,22	0,18	0,14	0,115	0,10
3	0,18	0,15	0,125	0,10	0,08
4	0,14	0,12	0,10	0,09	0,07

Напомена: За грубље прорачуне ове силе савијања могу се користити и следећи приближни обрасци:

$$F_{sm} \approx 0,4R_M bs \text{ (према Oehler-u)} \quad (57)$$

или, према неким ауторима:

$$F_{sm} \approx \frac{R_M bs}{2} \quad (58)$$

где се подразумева да су димензијске јединице следеће:

$$F[N]; R_M[N/mm^2]; b \text{ и } s [mm].$$

Код сила на држачу лима обично износи 25-30% од силе савијања биће стварна максимална сила на притискивачу:

$$F_{sm} = 2bsR_M k_2 + F_D \approx 2,5bsR_M k_2 \quad (59)$$

У случају да постоји завршно поравнавање, односно калибрисање, ова сила се даље повећава за F_k и може се практично узети да је:

$$F_k = (3-4)bsR_M k_2 \quad (60)$$

Релативна непрецизност резултата добијених по овом обрасцу произилази првенствено из чињенице да је, по природи ствари, сила завршног калибрисања мање одређена него сила потребна за слободно савијање.

При дефинисању основних елемената алата за двоугаоно савијање потребно је такође одредити: зазор између савијача и матрице (z), полупречник заобљења матрице (r_M) и дубину матрице h (она је, са своје стране, зависна од дужине кракова који се формирају при савијању). [5]

Зазор је уопште:

$$z_{\min} = s_{\max} \quad (61a)$$

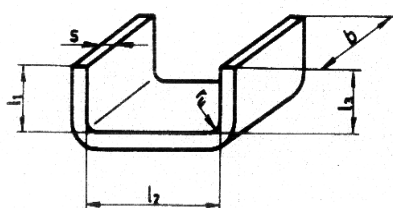
$$z_{\max} = s_{\max} + sn \quad (61b)$$

где је n - коефицијент који се може узети из табеле 6. у којој су наведене и вредности за h и r_M .

Табела 6 - Основни димензијски подаци за алате за двоугаоно савијање

Дужина крака (висина дела L [mm])	Дебљина лима s [mm]											
	0.1-0.5			0.5-2.0			2.0-4.0			4.0-7.0		
	h	r_M	n	h	r_M	n	h	r_M	n	h	r_M	n
10	6	3	0,10	10	3	0,20	10	4	0,08	-	-	-
20	8	3	0,10	12	4	0,10	15	5	0,08	20	8	0,06
35	12	4	0,15	15	5	0,10	20	6	0,08	25	8	0,06
50	15	5	0,20	20	6	0,15	25	8	0,10	30	10	0,08
75	20	6	0,20	25	8	0,15	30	10	0,10	35	12	0,10
100				30	10	0,15	35	12	0,10	40	15	0,10
150				35	12	0,20	40	15	0,15	50	20	0,10
200				45	15	0,20	55	20	0,15	65	25	0,15

Пример: Треба одредити неопходну силу пресе за савијање дела према слици 31. као и основне податке потребне за димензионисање алата. Одредити машину и за случај да се врши завршно поравњавање. Такође одредити потребну силу држача лима. Димензије дела су следеће: $b = 60\text{mm}$; $r_u = 3\text{mm}$; $s = 3\text{mm}$; $l_1 = l_3 = 35\text{mm}$; $l_2 = 130\text{mm}$. Затезна чврстоћа материјала $R_M = 500\text{N/mm}^2$. Савијање се врши у алату са држачем лима.



Слика 31 - Део који се треба савити

Решење: Сила савијања:

$$F_{sm} = 2,5bsR_M k_2$$

Коефицијент k_2 узима се из табеле 5. Претходно је потребно користећи податке у табели 6. наћи полупречник заобљења ивице матрице и он износи: $r_M = 6\text{mm}$ (за $s = 3\text{mm}$; $l_1 = l_3 = 35\text{mm}$).

Према томе однос $r_M / s = 2$, а $r_u / s = 1$, па се из табеле 5. налази $k_2 = 0,18$.

Коначно је потребна сила савијања:

$$F_{sm} = 2,5 \cdot 60 \cdot 3 \cdot 500 \cdot 0,18 = 40500[\text{N}]$$

Усваја се машина са максималном силом $50[\text{kN}]$.

Потребна сила држача лима је $F_D \approx 10[\text{kN}]$.

Из табеле 6. се, поред полупречника $r_M = 6\text{mm}$, узимају подаци о дубини калупа $h = 20\text{mm}$, као и коефицијент $n = 0,08$ који је потребан за дефинисање максималног зазора $z_{\max} = s_{\max} + sn$.

Уколико постоји завршно поравнавање онда се потребна сила може одредити сасвим грубо као:

$$F_k = (3-4)bsR_M k_2 = 48,6 - 64,8[kN]$$

па би било најпогодније обраду вршити на преси од 100[kN].

3.11.2 Деформациона сила при једноугаоном савијању у отвореном алату

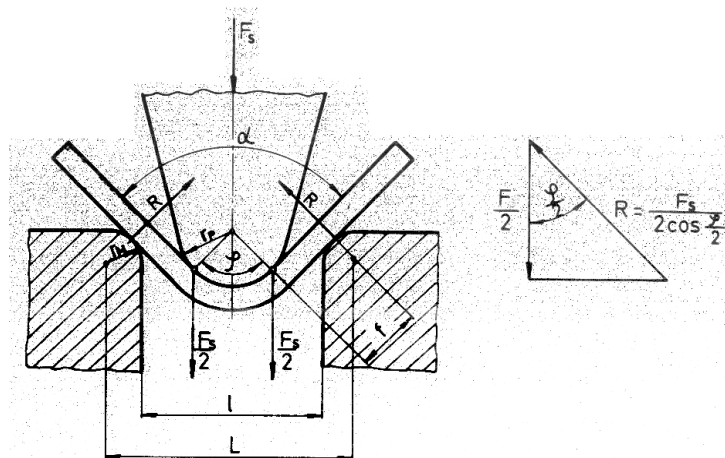
Шематски приказ деловања спољних сила за овај случај дат је на слици 32.

Полупречник притискивача r_p је у току савијања мањи или једнак унутрашњем полупречнику савијања: $r_p < r_u$. Када се достигне положај у коме је $r_p = r_u$ биће момент спољних сила: [5]

$$M = R_f = \frac{F_s}{2 \cos \frac{\varphi}{2}} f$$

Даље је, према слици:

$$\frac{L}{2} = r_p \cdot \sin \frac{\varphi}{2} + s \cdot \sin \frac{\varphi}{2} + f \cdot \cos \frac{\varphi}{2} + r_M \cdot \sin \frac{\varphi}{2}$$



Слика 32 - Силе при једноугаоном савијању у отвореном алату

$$f = \frac{\frac{L}{2} - a \cdot \sin \frac{\varphi}{2}}{\cos \frac{\varphi}{2}}$$

где је: $a = r_M + r_p + s$ и $\varphi = 180 - \alpha$

Уводећи ове вредности у једначину за момент, добија се сила савијања као:

$$F_s = \frac{4M}{\frac{L}{2} - a \cdot \sin \frac{\varphi}{2}} \cdot \cos^2 \frac{\varphi}{2} \quad (62)$$

Међутим, када се ради о слободном савијању, неће се учинити већа грешка ако се сматра да сила делује концентрисано на средини распона и да се тај распон l при савијању не мења.

У том случају било би:

$$M = \frac{F_s \cdot l}{4}$$

Оптимална величина растојања између ивица матрице (распона) за случај слободног савијања најчешће је у области:

$$l = (15 - 20)s$$

Када се овај момент изједначи са унутрашњим моментом M добија се:

$$F_{sm} = \frac{bs}{l} \cdot R_M \cdot n = bsR_M k_1 \quad (63)$$

где је: $k_1 = sn/l$ - коефицијент слободног савијања који се одређује експериментално. У табели 7. наведене су вредности овог коефицијента за неке материјале.

Табела 7 - Коефицијент k_1 за слободно једноугаоно савијање

Материјал	Коефицијент k_1 у зависности од односа l/s					
	8	10	15	20	25	30
Челик који приближно одговара Ћ.1121; месинг; меки алуминијум	0,23	0,18	0,21	0,09	0,073	0,06
Челик који приближно одговара Ћ.1330; ојачани алуминијум	0,21	0,17	0,11	0,086	0,070	0,057
Челик који приближно одговара Ћ.1430; дуралуминијум	0,20	0,16	0,10	0,08	0,065	0,053

Напомена: некада се израчунавање силе савијања врши грубо, уз претпоставку да је просечна вредност деформационог отпора једнака затезној чврстоћи. Међутим, на тај начин се често добијају знатно мање вредности (на пример, за 50%), због чега поступак треба избегавати, а резултате који се у литератури дају на основу њега користити обазриво.

3.11.3 Деформациона сила при једноугаоном савијању у затвореном алату

На слици 12. шематски је приказана поступност оваквог савијања. У току процеса се, поред осталог, непрекидно смањује првобитни распон између тачака ослањања l_1 да би на крају достигао вредност l_k , која уједно одређује величину потребног момента савијања. У почетку се врши слободно савијање све док краји савијеног дела не заузму положај који одговара углу алата и при томе је $r_u > r_p$, а распон l_1 одговара растојању тачака ослањања на ивицама матрице (а). Међутим, у даљем току савијања тачке ослањања се нагло померају ка средишту (б), што утиче на промену момента савијања, односно потребне силе.

Растојање између ивица матрице l_0 може се одредити тако што ће се довести у однос са полупречником савијања r_u , дебљином лима s и његовом чврстоћом. Одговарајући подаци обично се налазе из прикладних дијаграма. Међутим, за добијање нешто грубљих података, при савијању под 90° , могу се такође користити и следеће препоруке: [5]

Дебљина лима s у mm	<0,5	0,5-1	1-3	3-5	>5
Распон l_0 у mm	20s	16s	12s	10s	8s

Пример: Лим од меког алуминијума дебљине 2 mm треба савити под углом од 90° са унутрашњим полупречником кривине $r_u = 3mm$.

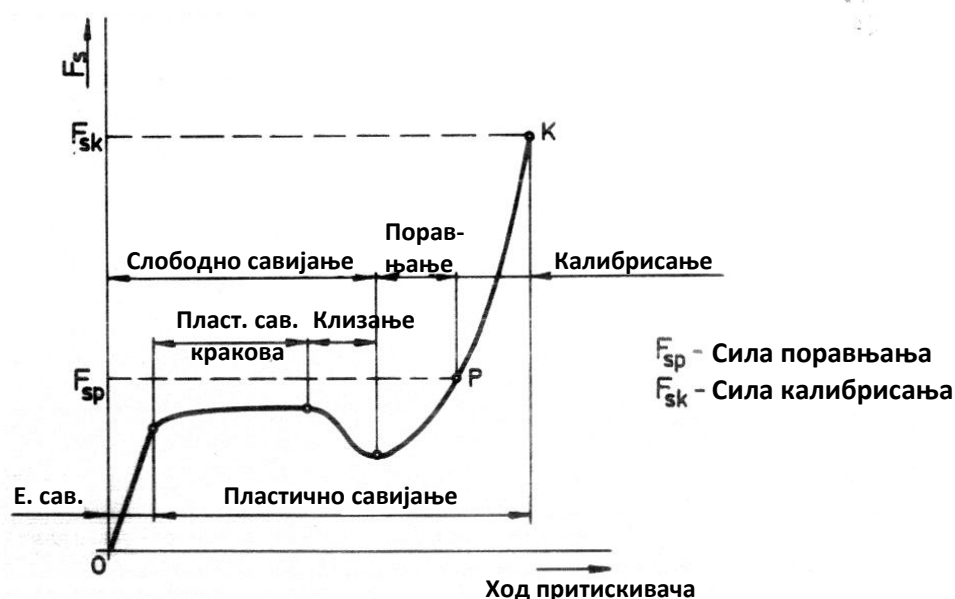
Проверити да ли је овакво савијање могуће и, ако јесте, одредити растојање (распон) ивица материјала l .

Решење: Према табели 4. најмањи полупречник савијања $r_{u\min} = 0,3s = 0,3 \cdot 2 = 0,6\text{mm}$, што значи да се савијање са $r_u = 3\text{mm}$ може остварити.

За дебљину лима $s = 2\text{ mm}$ биће распон:

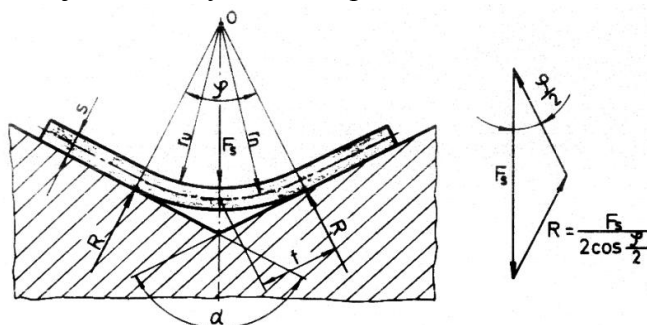
$$l_o = 12s = 12 \cdot 2 = 24\text{mm}$$

На слици 33. дата је шема промене силе савијања у зависности од хода притискивача. Може се запазити да почетни део ове криве одговара еластичном савијању, затим се величина силе устаљује - слободно савијање, да би после тога дошло до пада силе (клизања кракова по бочним странама алата). После тога се кракови дела исправљају и сила поново расте да би на крају, када дође до потпуног налегања алата на савијени део, порасла до максимума, који може бити знатно изнад силе савијања уколико се врши калибрисање.



Слика 33 - Промена силе при једноугаоном савијању са калибрисањем

Општи израз за момент савијања може се одредити на исти начин као и у претходним случајевима, тј. на основу односа према слици 34.



Слика 34 - Шема деловања сила при савијању угаоника у затвореном алату

$$M = R_f = \frac{F_s}{2 \cos \frac{\varphi}{2}} f$$

$$f = r_n \cdot \sin \frac{\varphi}{2}$$

$$M = \frac{F_s}{2 \cos \frac{\varphi}{2}} f \cdot r_n \cdot \sin \frac{\varphi}{2} = \frac{F_s \cdot r_n}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \quad (64)$$

односно сила савијања

$$F_s = \frac{2M}{r_n} \cdot \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} \quad (65)$$

Практично се може узети да је $\varphi=90^\circ$ и ако се уместо M уврсти M_σ добија се:

$$F_{sm} = \frac{2}{r_n} \cdot \frac{bs^2}{4} \cdot R_M n \approx \frac{bs^2}{r_u + s} \cdot \sigma_M \quad (66)$$

Ако се у завршном стадијуму савијања врши и калибрисање, онда се сила калибрисања израчунава према обрасцу:

$$F_k = pA \quad (67)$$

p - специфични притисак калибрисања који се може узети из табеле 8., а A - површина дела који се калибрише (под притискивачем), тј. контактна површина.

Јасно је да у овом случају силе које се јављају у току процеса не могу бити меродавне за избор машине с обзиром да их потребна сила калибрисања знатно превазилази и да зависи првенствено од услова и степена калибрисања.

Према неким грубо-искуственим препорукама, за случај завршног поравнавања (дакле, не правога калибрисања), довољно је узети $F_{sp} = 2F_{sm}$, где је F_{sp} - завршна сила, а F_{sm} максимална сила слободног савијања.

Табела 8 - Приближне вредности специфичних притисака калибрисања p [N/mm^2] (за делове мањих димензија)

Материјал	Притисак p при дебљини лима s у mm			
	<1	1-2	2-5	5-10
Алуминијум	10-15	15-20	20-30	30-40
Месинг	15-20	20-30	30-40	40-60
Челици који одговарају Ћ.1121-Ћ.1330	20-30	30-40	40-60	60-80
Ћ.1430	30-40	40-50	50-70	70-100

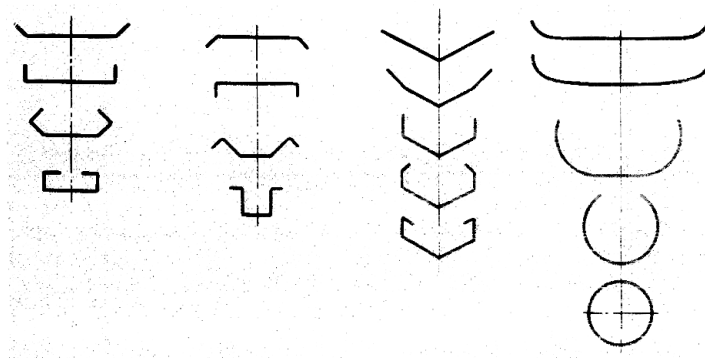
3.12 Профилно савијање

Обликовање профилним савијањем (или профилисање) подразумева такво савијање делова од лима, при коме се добијају производи релативно велике дужине и различитих профила. Најчешће се ради о вишеугаоном савијању, које се може изводити на специјалним машинама, али и у алатима на универзалним пресама.

3.12.1 Машине, алати, процес обликовања

Профилисање на универзалним пресама (кривајним, коленастим,...) користи се при изради сложених полузатворених и отворених профила мање дужине, уколико се не располаже специјалних пресама за савијање или машинама за профилисање.

На специјалним пресама за савијање врши се израда отворених и полузатворених профила веће дужине (преко 10м), при чему се користи одговарајући алат.



Слика 35 - Неке операције профилисања

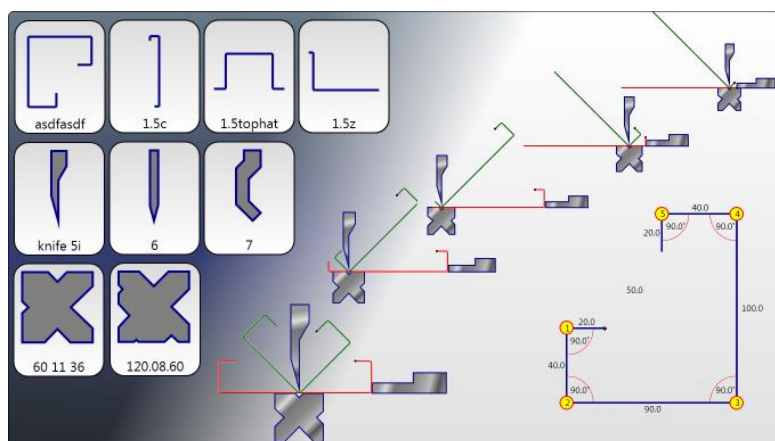
Овакво профилисање се врши у једном или више узастопних операција. У овом задњем случају се најчешће користи мање-више универзални алати за поједине операције, код којих се притискивачи међусобно разликују по облику и величинама полупречника заобљења. На слици 35. су шематски приказани неки од бројних профила који се формирају на специјалним пресама за савијање.

На универзалним машинама за савијање врши се савијање (пресавијање) трака и табли лима по правој линији. При томе је најчешће у питању лим мање дебљине. Принципијелна шема рада ових машина дата је на слици 36.



Слика 36 - Принцип рада машине за пресавијање

Поступак профилисања при којем се на крају добија савијен крај лима у облику профила, види се на слици 37., а на слици 38. изглед једне савремене машине за савијање профилисањем.



Слика 37 - Поступност формирања профила од лима на машини за савијање профилисањем



Слика 38 - Машина за савијање профилисањем (Абкантпреса)



Слика 39 - Абкант преса носивости 4000t, радне дужине 14 метара



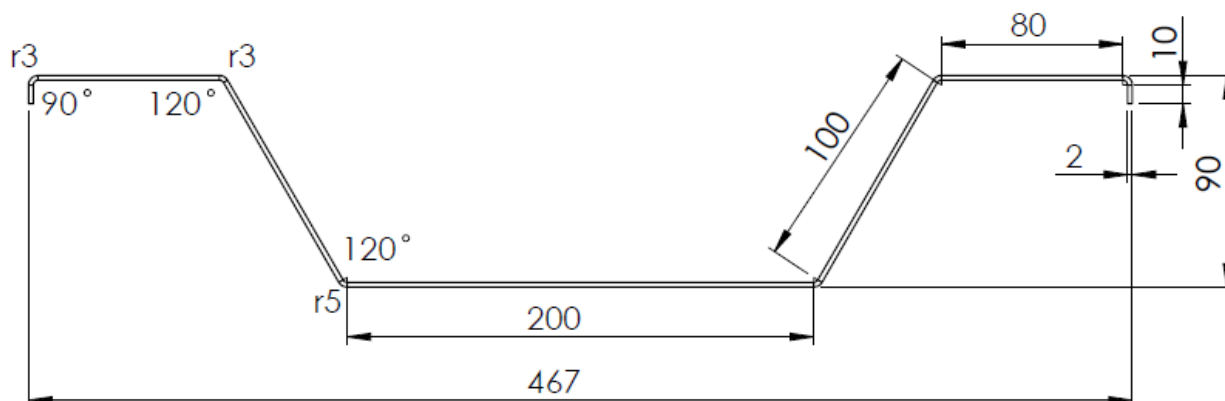
Слика 40 - Савијање лима у *U* профил

Масовна производња појединих профила велике дужине и таласастих лимова изводи се на специјалним машинама за профилисање танких лимова помоћу ваљака. Оне могу имати и више од 20 радних позиција са одговарајућим ваљцима у захвату. Иако трака лима континуално иде (често брзином и преко 3m/s) и процес непрекидно траје, обликовање је поступно, вишеоперационо са релативно малим углом савијене зоне у једној операцији. То омогућава добијање веома сложених профила. Изводе се и неопходне помоћне операције, као што је одсецање тзв. летећим маказама.

4. АНАЛИЗА ПРОЦЕСА ПРОФИЛНОГ САВИЈАЊА НА КОНКРЕТНОМ ПРИМЕРУ

4.1 Геометрија и карактеристике комада

Приказани комад на слици 41 представља хладно обликован отворен профил на коме ће се вршити анализа процеса профилног савијања. Под хладно обликованим профилем подразумева се конструктивни елементи произведен хладним обликовањем челичних лимова и трака. Уобичајена дебљина челичних лимова и трака које се користе за производњу хладно обликованих производа крећу се од 0,4mm до 6,0mm, а дебљина лима приказаног комада на слици 41 износи 2mm.



Слика 41 - Геометријске мере отвореног профила на коме ће се вршити анализа процеса профилног савијања

Овако израђен профил се може примењивати у:

- грађевинарству
- мостоградњи (ивични носачи, одбојници, граничници, итд.),
- специјалним конструкцијама (стубови далековода, торњеви, јарболи, итд.).

На носивост хладно обликованог отвореног профила велики утицај има облик попречног пресека. Производни процеси су се значајно развили па је лако добити различите облике профила од челичних лимова. Са што већим бројем савијања добија се профил веће носивости, јер се савијањем лим ојачава. Посматрани профил садржи четири савијања, а додатно укрућење му пружају повијене ивице.

4.2 Одређивање карактеристика материјала

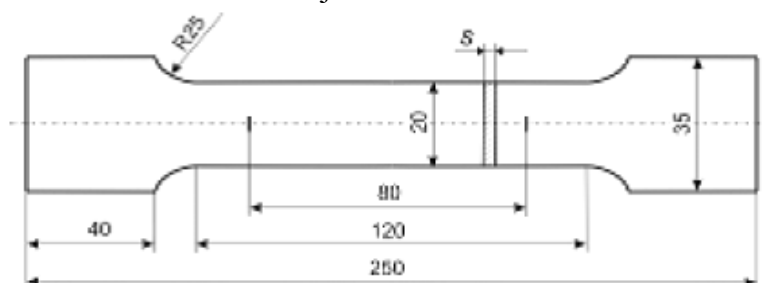
Хладно обликовани профили добијају се углавном од нискоугљеничних и легираних челика, са границом течења од 250 до 630MPa. Они имају веома низак садржај угљеника, око 0,1% C.

С обзиром на врло сложен технолошки поступак добијања оваквих профила веома је тешко обезбедити стабилност квалитета лима од произвођача. Ово је делимично и последица што одговарајући стандарди за квалитет лима прописују само минималне односно максималне вредности механичких карактеристика.

Стандардна испитивања лимова при производњи и преради углавном се заснивају на испитивању затезањем, одређивању хемијског састава, металографском испитивању микроструктуре, контроли тврдоће, провери стања површина итд. Поред наведених

карактеристика, за дефинисање квалитета лима, у новије време све већи значај имају ванстандардни показатељи, као што је степен деформационог ојачања (n) и коефицијент анизотропије (r). Најзначајније карактеристике лима које се у овом раду разматрају, одређене су лабораторијским испитивањима.

При испитивању затезањем одређује се велики број карактеристика материјала битних за оцену способности лима за савијање.



Слика 42 - Димензије епрувета за одређивање механичких карактеристика материјала



Слика 43 - Изглед епрувета за одређивање механичких карактеристика материјала

Испитивање затезањем је изведено на савременој машини за испитивање на собној температури. Основни подаци дати у извештају о испитивању су:

Customer:	N. Stojkovic 736/2014
Tester:	FIN-MDj
Test standard:	EN10002 Part 1
Material:	Cel lim 2,0 mm
Load cell:	Fmax 100kN
Extensometer (path):	Crosshead
Specimen grips:	pneumatic grips B8597
Machine data:	Control SN: 158688
	Crosshead SN: 158688
	Force SN: 158513 100 kN

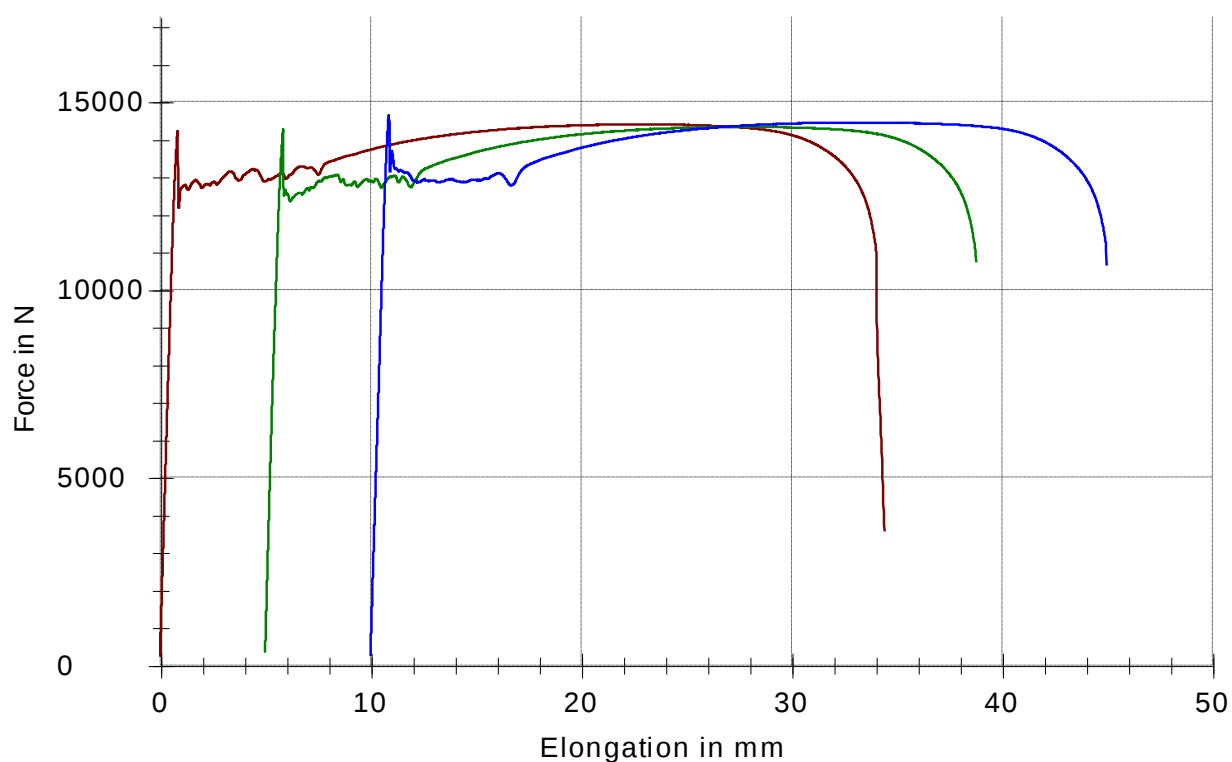
У току испитивања на уређају за мерење, утврђене су вредности границе течења $R_{p0,2}$, затезне чврстоће R_m и процентуална издужења епрувете која су приказана табеларно.

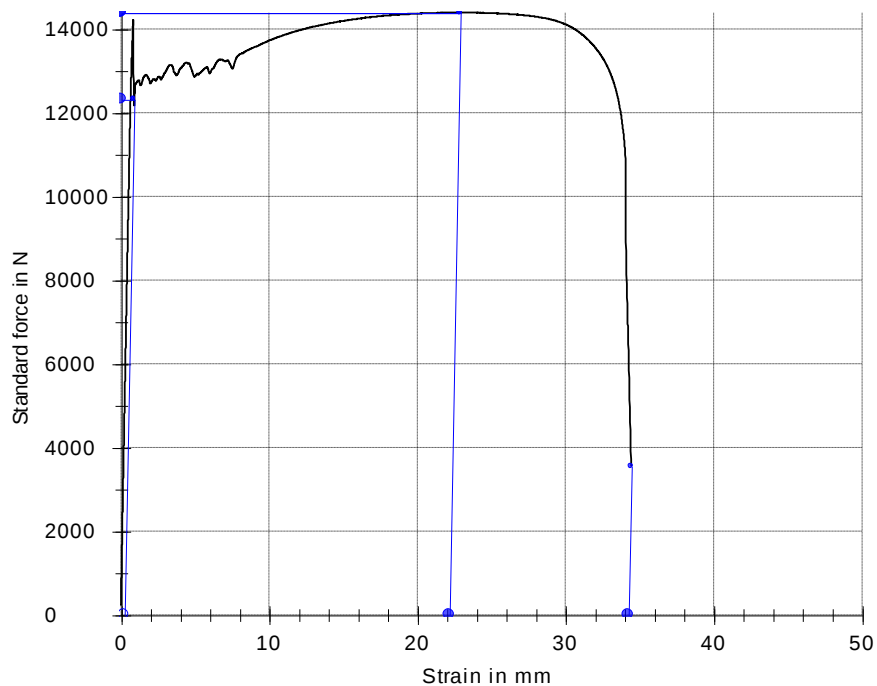
Табела 9 - Механичке карактеристике испитиване епрувете од материјала *Č.0362 (S235JR)*

		S_0	L_0	$R_{p0,2}$	R_m	A_g	A
Легенда	Nr	mm ²	mm	N/mm ²	N/mm ²	%	%
□	1	40.00	120.00	307.93	359.84	18.47	28.54
□	2	40.00	120.00	326.63	358.17	18.35	27.72
□	3	40.00	120.00	329.19	365.58	18.51	28.68

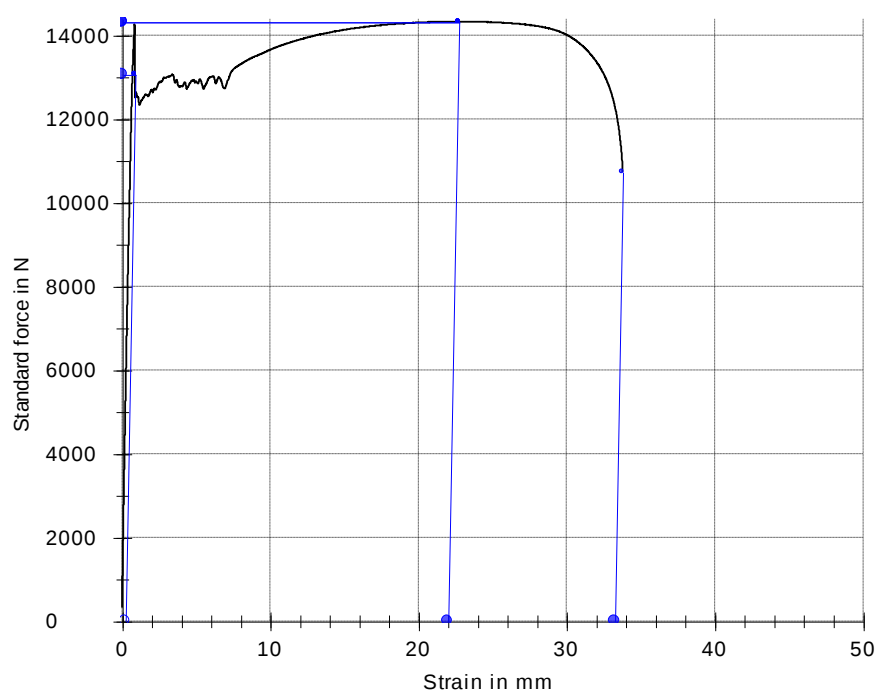
**Слика 44** - Изглед епрувета након одређивања механичких карактеристика материјала

На сликама 45, 46, 47, 48 је графички приказано понашање материјала при испитивању затезањем у виду дијаграма на чијој је ординати нанета сила која делује на епрувету, а на апциси тренутно издужење.

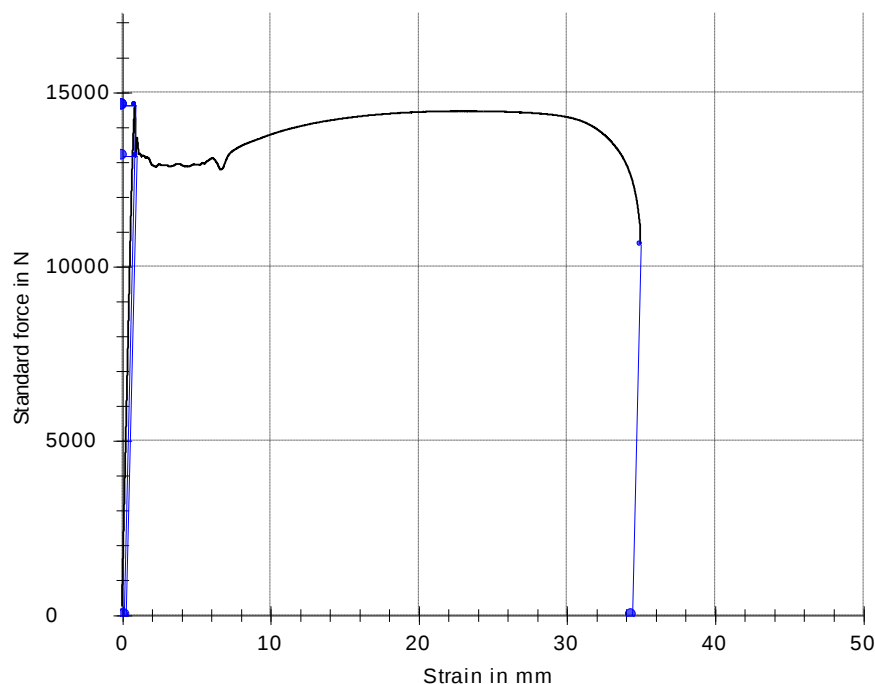
**Слика 45** - Збирни дијаграм



Слика 46 - Епрувета 1



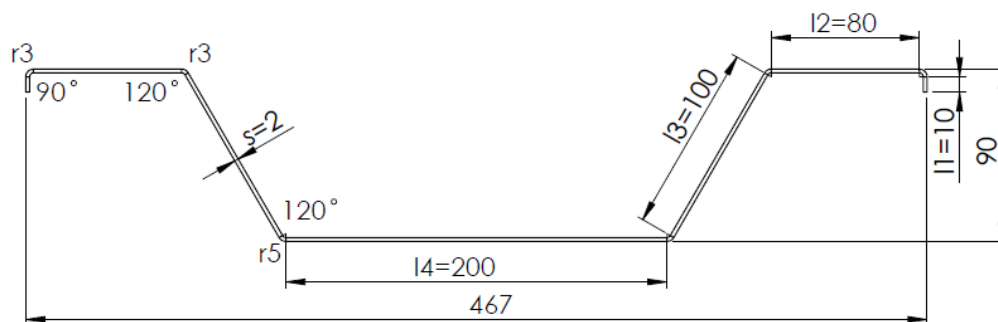
Слика 47 - Епрувета 2



Слика 48 - Епрувета 3

4.3 Облик и димензије развијеног стања

Да би обрадом савијањем добили предмет тражених димензија и облика, потребно је да одредимо тачне димензије развијеног стања. Развијено стање одређује се на основу цртежа готовог комада.



Слика 49 - Попречни пресек савијеног дела

Прво се подели готов предмет на дужине l_i . Укупна дужина добија се као збир дужина несавијених делова и дужина неутралних оса у савијеним зонама, тј.

$$L = 2 \cdot (l_1 + l_2 + l_3 + l_{n1} + l_{n2} + l_{n3}) + l_4$$

$$L = 2 \cdot [10 + 80 + 100 + 0,0174 \cdot 90 \cdot (r_1 + x_1 \cdot s) + 0,0174 \cdot 60 \cdot (r_2 + x_2 \cdot s) + 0,0174 \cdot 60 \cdot (r_3 + x_3 \cdot s)] + 200$$

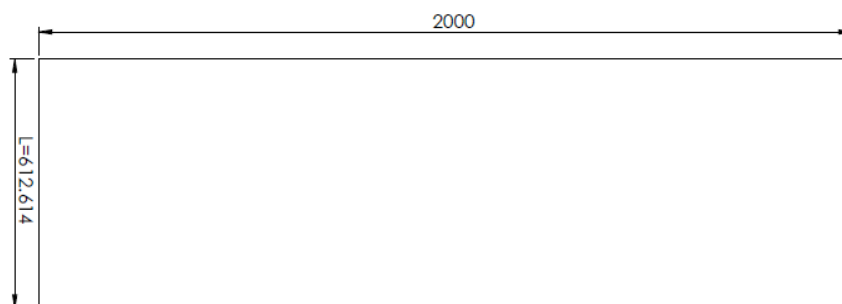
Коефицијенти померања неутралног слоја налазе се у Табели 1 и они износе:

$$x_1 = 0,44 \quad x_2 = 0,44 \quad x_3 = 0,46$$

Коначно се добија:

$$L = 2 \cdot [10 + 80 + 100 + 0,0174 \cdot 90 \cdot (3 + 0,44 \cdot 2) + 0,0174 \cdot 60 \cdot (3 + 0,44 \cdot 2) + 0,0174 \cdot 60 \cdot (5 + 0,46 \cdot 2)] + 200$$

$$L = 612,614mm$$



Слика 50 - Развијено стање

4.4 Операције обликовања и деформационе силе

Претходно дефинисано развијено стање се савија у 5 фаза како би се добио савијени предмет траженог облика.

Да бисмо одредили потребу силу савијања за I и II савијање потребно је најпре одредити растојање између ивица матрице l_o . Оно се може одредити тако што ће се довести у однос са полупречником савијања r_u , дебљином лима s и његовом чврстоћом.

Према табели 4. најмањи полупречник савијања $r_{u\min} = 0,3s = 0,3 \cdot 2 = 0,6mm$, што значи да се савијање са $r_u = 3mm$ може остварити.

За дебљину лима $s = 2mm$ биће растојање између ивица матрице:

$$l_o = 12s = 12 \cdot 2 = 24mm$$

За $r_u/s < 5$, односно $3/2 < 5$ одакле следи да је $1,5 < 5$ момент унутрашњих сила се рачуна по изразу:

$$M_\sigma = n \cdot R_M \frac{b \cdot s^2}{4}$$

Корекциони фактор ојачања n креће се у границама $n = 1.6 - 1.8$. Усваја се $n = 1.8$.

Затезна чврстоћа материјала за S 235 J0 износи:

$$R_M = 365.58N/mm^2$$

Заменом у израз за момент унутрашњих сила добија се вредност момента, односно:

$$M_\sigma = 1,8 \cdot 365.58 \cdot \frac{2000 \cdot 2^2}{4} = 1316088Nmm$$

Потребна сила за повијање крајева износи:

$$F_s = \frac{2M_\sigma}{r_n} \cdot \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} = \frac{2 \cdot 1316088}{3,88} \cdot \operatorname{ctg} \frac{90}{2} = 678395,8763N = 678,4kN$$

Потребна сила за I и II савијање износи:

$$F_s = \frac{2M_\sigma}{r_n} \cdot \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} = \frac{2 \cdot 1316088}{3,88} \cdot \operatorname{ctg} \frac{60}{2} = 1175036,5827N = 1175,1kN$$

Да бисмо одредили потребу силу савијања за III и IV савијање потребно је најпре проверити однос r_u/s .

$$r_u / s < 5$$

$$5/2 < 5$$

$$2,5 < 5$$

Потребна сила за III и IV савијање износи:

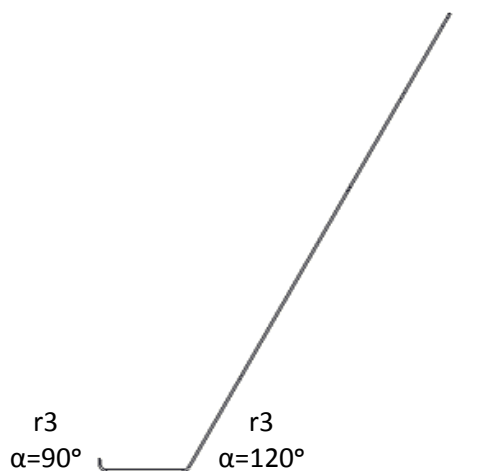
$$F_s = \frac{2M_\sigma}{r_n} \cdot \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} = \frac{2 \cdot 1316088}{5,92} \cdot \operatorname{ctg} \frac{60}{2} = 770111,9166 N = 770,2 kN$$

Из овога се закључује, да је за релативно оштре ивице савијања потребна већа сила него за знатнија заобљења.

Фазе савијања приказане су у наставку:

10 - повијање крајева, r3

20 - I савијање r3, $\alpha=120^\circ$



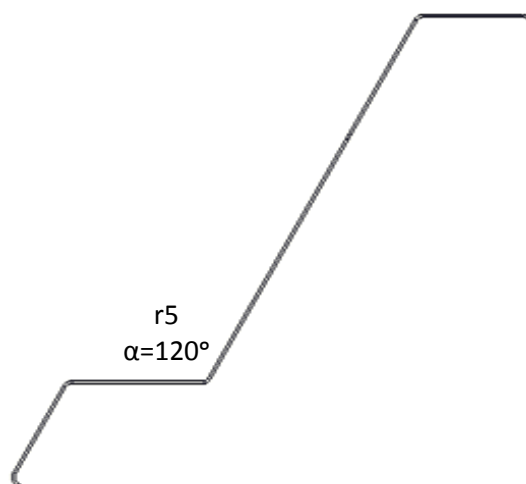
Слика 51 - I савијање

30 - II савијање r3, $\alpha=120^\circ$



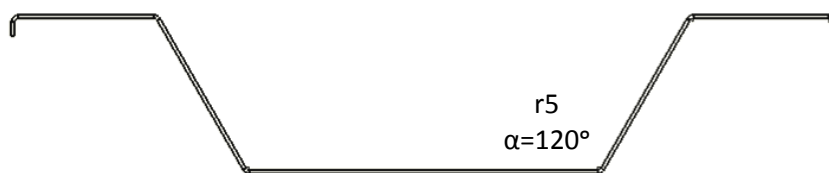
Слика 52 - II савијање

40 - III савијање r5, $\alpha=120^\circ$



Слика 53 - III савијање

50 - IV савијање r_5 , $\alpha=120^\circ$



Слика 54 - IV савијање

5. ЗАКЉУЧАК

Савијање спада у најчешће операције обраде метала деформисањем. У многим случајевима то је само једна од операција сложенијег процеса обраде, тј. оно се може комбиновати са извлачењем, просецањем, итд.

Полазни материјал (полуфабрикат) је најчешће лим у виду траке или табле, што је детаљно обрађено у овом раду, али то може да буде жица, пун профил и цев. Дебљина лимова за савијање креће се од стотих делова милиметра па до неколико десетина милиметра.

Изводи се најчешће у алатима постављеним на универзалним пресам (ексцентарске, коленасте, хидрауличне итд) или на специјалним пресам. С обзиром на облик и број места савијања може бити: једно, дво и вишеугаоно.

Број операција савијања при обради неког дела зависи од његове конфигурације, жељене тачности, примењене технологије, обима и других услова производње.

Угаоно савијање мањих и средњих делова се најчешће врши у специфичним алатима на универзалним пресам, а већих на посебним пресам за савијање (нем. Abkantpressen).

Код угаоног савијања деформација је локализована, тј. ограничава се само на зону савијања. Основна технолошко-конструкционе карактеристике ове операције су: полупречник и угао савијања.

У већини случајева при обради лима врши се савијање делова са малим полупречницима кривине. Тиме се, поред осталог, постиже и њихова већа општа крутост. Да би се омогућило успешно савијање и избегло разарање материјала у спољној затегнутој зони потребно је знати до ког се најмањег полупречника уопште може вршити савијање. Препоруке за минимални полупречник савијања су приказане табеларно у раду.

У укупну деформацију која се остварује савијањем укључена је, поред пластичне, и еластична деформација. По ослобађању савијеног дела из алата ове еластичне деформације добрим делом настају, услед чега се мења (повећава се) угао савијања α , као и полупречник савијања (унутрашњи полупречник дела r_u). Ова појава се назива еластично исправљање или повратност. Величина еластичног исправљања зависна, како од својстава материјала, тако и од односа r_u/s .

Да би обрадом савијањем добили предмет тражених димензија и облика, потребно је да одредимо тачне димензије почетног материјала. Димензија развијеног стања одређује се на основу цртежа готовог комада.

С обзиром на врло сложен технолошки поступак добијања савијених профила веома је важно обезбедити стабилност квалитета од произвођача лима. Ово је релативно тешко јер одговарајући стандарди за квалитет лима прописују само минималне односно максималне вредности механичких карактеристика. Због тога је потребно извршити лабораторијско испитивање лима за већу производњу профила јер се на тај начин одређују одговарајуће карактеристике материјала битне за оцену способности за савијање.

За свако савијање потребно је одредити потребну силу којом ће притискивач деловати на развијено стање. Она зависи од момента унутрашњих сила, полупречника и угла савијања.

У практичном делу овог рада разрађен је технички поступак израде коритастиг профила савијеног од лима дебљине 2mm. Материјал лима је Č.0362 (S235JR). Извршено је испитивање материјала и утврђене су основне механичке карактеристике. Затим је дефинисано развијено стање, дефинисан технолошки процес и прорачунате су потребне деформационе силе.

6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Александровић С., Стефановић М.: Технологија пластичног обликовања метала, уџбеник, Машински факултет Крагујевац, 2010.
- [2] John A. Waller: Press tools and presswork, Portcullis Press, Bristol, England, 1978.
- [3] Metal Forming Handbook, Schuler, Springer - Verlag, Berlin - Heidelberg, 1998.
- [4] Девеџић Б.: Пластичност и обрада метала деформисањем, Научна књига Београд, 1992.
- [5] Девеџић Б.: Обрада метала деформисањем - други део, Грађевинска књига Београд, 1981.
- [6] Александровић С.: Технологија пластичног обликовања метала, скрипта, Факултет инжењерских наука, 2011.