

**Факултет инжењерских наука Универзитета у
Крагујевцу**

Лазар М. Арсић

**Пластично обликовање у топлом
стању на примеру ковања
угљеничних челика
завршни рад**

Крагујевац, 2015.

**Факултет инжењерских наука Универзитета у
Крагујевцу**



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

**Предмет: Производне технологије 2 – Технологија пластичног
обликовања**

Број индекса: 78/2012

Лазар М. Арсић

**Пластично обликовање у топлом
стању на примеру ковања
угљеничних челика
завршни рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. **Др Србислав Александровић, ред. проф. - ментор**

2. _____

3. _____

Датум

одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да:

У првом, општем делу рада прегледно изложи разматрање о обликовању у топлом стању (дефиниције, процес рекристализације, структурне промене, деформационо ојачање, пластичност и деформабилност, утицајни фактори итд.), као и разматрање о процесу ковања угљеничних челика са акцентом на специфичности ковања на механичким ковачким пресама и ковачким чекићима двоструког дејства.

У другом, практичном делу рада треба да прикаже одређивање технолошких параметара ковања за 8 карактеристичних геометрија, анализира резултате и одреди могућности примењеног поступка.

На крају дати закључна разматрања о теми, и посебно о добијеним резултатима.

Препоручена литература:

- [1] Девеџић, Б.: Обрада метала деформисањем, IV део - Увод у технологију ковања, Машински факултет у Крагујевцу, 1985.
- [2] Александровић, С., Стефановић, М.: Технологија пластичног обликовања метала, уџбеник, Машински факултет у Крагујевцу, 2010.
- [3] Александровић, С.: Савремени поступци пластичног обликовања, скрипта, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, 2014.

Крагујевац, новембар

Ментор:

Др Србислав Александровић, ред. проф.

САДРЖАЈ

ПРЕДГОВОР

1. УВОД.....	1
2. ОБЛИКОВАЊЕ У ТОПЛОМ СТАЊУ	2
2.1 Процес опорављања и рекристализације.....	3
2.1.1 Опорављање.....	4
2.1.2 Рекристализација	5
2.2 Утицаји на деформационо ојачање и деформабилност.....	9
3. ТОПЛО КОВАЊЕ УГЉЕНИЧНИХ ЧЕЛИКА	13
3.1 Слободно ковање.....	14
3.2 Ковање у калупима.....	15
3.3 Геометрија отковака.....	16
3.4 Ковање на механичким ковачким пресама.....	19
3.5 Ковање на ковачким чекићима двоструког дејства.....	22
4. ОДРЕЂИВАЊЕ ПАРАМЕТАРА ЗА ИЗБОР МАШИНЕ НА КОНКРЕТНИМ ПРИМЕРИМА.....	25
4.1 Примери ковања на механичким ковачким пресама	26
4.2 Примери ковања на ковачким чекићима двоструког дејства.....	31
5. ЗАКЉУЧАК.....	36
ПРИЛОГ - најчешће коришћени челични материјали за израду предмета обраде и ковачких алата.....	37
6. ЛИТЕРАТУРА.....	38

ПРЕДГОВОР

У савременом, технички развијеном свету, ковање представља једну од кључних технологија за израду делова. Ковањем се могу изградити делови једноставне и сложене геометрије али и предмети за свакодневну употребу или пак веома одговорни, динамички оптерећени машински делови. Већина захтева у савременој индустрији се односи на повећање издржљивости делова а ковање као технологија има низ предности када је производња таквих делова у питању.

Да би се процес ковања извео на најбољи начин, неопходно је користити оптималне параметре ковања. Они се могу односити на материјал, геометрију полазног комада, геометрију коначног дела (отковка) или пак на параметре машине као једне од најбитнијих. Било да се ради о ковању на ковачким пресам или ковачким чекићима, потребно је на што тачнији и оптималнији начин израчунати силу ковања пресе или масу падајућих делова чекића. Уколико је избор наведених и осталих параметара оптималан створиће се услови за израду дела одговарајуће геометрије и димензија.

Циљ аутора овог рада је да покаже могућности за израчунавање силе ковања и масе падајућих делова чекића и покаже до којих димензија полазног комада постојећи емпиријски изрази дају прихватљиве вредности.

Добијени резултати могу корисно послужити при израчунавању наведених параметара као и при избору врсте ковања у зависности од димензија полазног комада.

Овом приликом желим да се захвалим ментору проф. др Србиславу Александровићу на разумевању, посвећеном времену и свестраној и несебичној помоћи пруженој при изради овог рада.

Такође, захвалност дугујем и свима другима који су на било који начин помогли изради овог завршног рада.

1. УВОД

Ковање је најстарији начин пластичног обликовања метала. Ковањем су се у почетку добијали производи као што је накит, различита оруђа, оружја, посуде, итд. Сматра се да је ковање као техника и технологија почело да се развија још у IX веку пре нове ере када су се први пут метали употребили за израду разних предмета и алата. Међутим читава два миленијума за ковање је коришћена искључиво људска енергија, што је, поред осталог, знатно ограничавало ковање на израду делова мањих димензија. Тек почетком XII века наше ере за ковање почињу да се користе машине на хидраулични погон чију су улогу касније преузеле парне и електричне машине. У првим деценијама индустријске ере доминирало је слободно ковање, тј., људска енергија све више замењивала машинском, док је управљање процесом обликовања и даље водио човек. Нешто касније долази до интензивног увођења и развоја ковања у калупима, чиме је омогућено да се човек ослободи и функције управљања процесом, а уједно су се створили услови за добијање висококвалитетних отковака. Тако произведене отковке одликовали су међусобно једнаки и рационално произведени отковци у оквиру серијске и масовне производње, карактеристичне за виши степен индустријске развијености. Тиме слободно ковање није сасвим потиснуто јер се оправдано може користити при изради отковака у појединачној или малосеријској производњи, као и при ковању делова изузетно великих димензија. Са друге стране, ковање у калупима је постало доминантан вид ове врсте обраде, која се и даље интензивно развија и усавршава. Самим тим долази и до развоја ковачких алата и машина, њихове аутоматизације и др. Све то прати и стални развој техничких и технолошких параметара везаних за ковање као што су: загревање отковака, контролисано вођење процеса обликовања, термичка обрада, итд. Посебна пажња се у новије време обраћа и на рачунарску технику, софтвере и нумеричку анализу које су у данашњим индустријским условима готово незаменљиве јер могу значајно да утичу на скраћење времена пројектовања производа, његове израде и пласирања на тржиште.

Новији технолошки развој заправо иде за тим да се, уз коришћење савремених достигнућа, у што већем броју случајева добијају отковци такве тачности и квалитета да обим њихове неопходне накнадне обраде резањем буде минималан (на пр., само фино стругање или брушење на функционалним површинама), експлоатационе карактеристике побољшане, а производња што продуктивнија и што економичнија. У супротном, долази до пораста времена потребног за израду дела што даље утиче и на цену дела итд.

Ковање се може обављати у топлом и хладном стању. Хладно ковање се користи за ковање делова мањих димензија и веће тачности док ковање на топло има неупоредиво ширу примену али код овог вида ковања долази до ширења делова и алата услед високих температура па и о томе треба водити рачуна.

2. ОБЛИКОВАЊЕ У ТОПЛОМ СТАЊУ

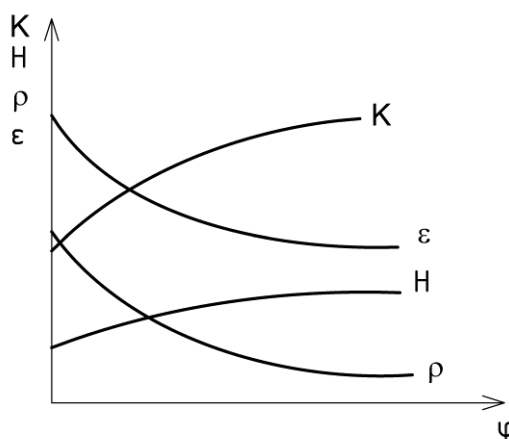
Обликовање представља поступак промене геометрије радног предмета деловањем сила одређеног интензитета путем крутог или деформабилног алата. У поступке пластичног обликовања се уопштено могу убројати: сабијање, ковање, истискивање, пресовање и др. Поступци пластичног обликовања имају веома велику примену због низа предности које их прате. Те предности се пре свега огледају у повољним механичким карактеристикама материјала који се обликује јер нема прекидања металних влакана материјала али и тачности делова, смањеној маси и др. На процес обликовања утиче велики број фактора од којих су неки најважнији: температура, брзина обликовања, карактеристике материјала и др.

Процес пластичног обликовања неминовно прати и радна температура која се најчешће разликује од собне а која представља један од најбитнијих параметара обраде. С обзиром на температура на којој се изводи процес пластичног обликовања разликују се:

- а) обликовање на хладно,
- б) обликовање на топло и
- в) обликовање у полутоплом стању.

Данас је у индустрији заступљеније обликовање на топло зато што је код тог вида обликовања деформациони отпор материјала мањи а самим тим је потребна и мања сила за обликовање.

Услов за хладно деформисање је да температура радног комада буде нижа од температуре рекристализације ($T_{\text{хл}} < T_p$). У највећем броју случајева то значи да нема загревања материјала и да се процес изводи на собној температури. Са порастом претходног степена деформисања у хладном стању, долази до структурних промена праћених падом карактеристика пластичности ϵ (сл. 2.1) и жилавости (ρ), а порастом тврдоће H (сл. 2.1) и напонских карактеристика као што су чврстоћа и напон течења (K).



Слика 2.1 Зависности карактеристика чврстоће и пластичности од степена претходне деформације при хладној обради

При хладној обради постиже се висок квалитет површина и тачности димензија. Најчешће се не изводи било какво загревање материјала, али тешкоће ствара веома изражено деформационо ојачавање (нарочито код челичних материјала), праћено порастом напона течења и чврстоће, а смањењем пластичности

Топла обрада изводи се на температурама материјала вишим од температуре рекристализације ($T_T > T_P$) што омогућава истовремено одвијање процеса обнављања структуре материјала праћено задржавањем велике пластичности. Основне особине ове обраде, у односу на обликовање у хладном стању су: знатно нижи деформациони отпор, повећана пластичност материјала, нижи квалитет површина и нижа тачност димензија, али је потребан и већи број операција и више опреме за загревање што најчешће доводи до виших трошкова производње.

Обрада на температурама које су граничне за топлу и хладну обраду дефинисана је као полутопла обрада. Полутопла обрада према критеријуму температуре рекристализације спада у хладно обликовање, али се назив уобичајено користи ако је температура релативно висока и ако се делимично постижу ефекти и хладне и топле обраде. За челике интервал температуре полутопле обраде је 450°C до 700°C .

2.1 Процес опорављања и рекристализације

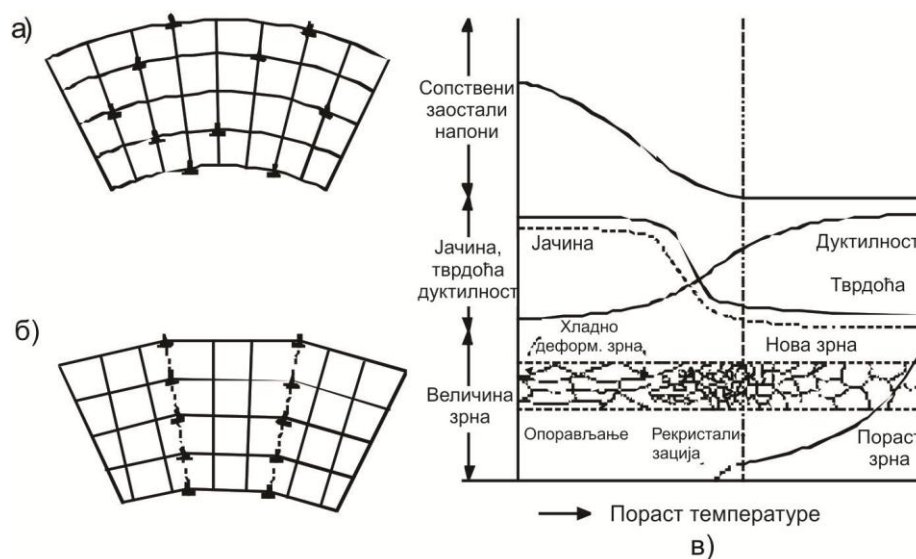
С обзиром на то да рекристализација и температура рекристализације дефинишу врсту обраде, неопходно је у склопу овог рада објаснити и процес рекристализације, услове за њен настанак и ефекте те појаве.

Промене особина материјала после пластичне деформације на хладно које су последица повећане густине дефеката кристалне решетке, у многим случајевима су пожељне и често се користе у техничкој пракси (нпр. вучење жица на хладно, цеви и тсл.). Будући да те новонастале особине метала неминовно прати смањење жилавости и пластичности, те нове особине материјала понекад могу бити непожељне пре свега зато што смањена пластичност материјала отежава или чак спречава даљу прераду пластичним обликовањем. Могућности промене својстава метала ојачаног на хладно заснивају се на чињеници да са порастом степена деформисања расте његова слободна енергија, тј. атоми у дислокацијама имају већу енергију него атоми у идеалној решетки, па је зато повећање густине дислокација праћено повећањем енергије обликованог метала. Ако се створе погодни услови (загревањем деформисаног метала), мењаће се распоред атома у деформисаном металу тако да се при томе његова слободна енергија снижава. Последице претходног деформисања ће се постепено одстрањивати, а унутрашња кристална грађа (структура) метала ће се приближавати почетном стању пре деформисања. Та промена условљена је појавом дифузије која настаје услед присуства топлоте и чији интензитет директно зависи од температуре. Дакле, може се рећи да је процес опорављања и рекристализације везан за појаву дифузије.

Постоје два стадијума обнове деформисане структуре (сл. 2.2):

- а) опорављање и

б) рекристализација.



Слика 2.2 Распоређивање дислокација: а) пре опорављања, б) после опорављања, в) укупан ефекат жарења, опорављања и рекристализације

2.1.1 Опорављање

Опорављање деформисане структуре, одвија се углавном испод температуре рекристализације, тако да микроструктура деформисаног метала остаје непромењена (облик и величина зрна одговарају стању после окончања деформације), при чему и оријентација кристалних решетки појединачних зрна такође остаје у основи задржана. Због тога се ток опорављања не може пратити оптичким микроскопом. Поред микроструктуре, ни густина дефеката решетке се изразито не мења. При опорављању најпре долази до дифузије тачкастих дефеката (ваканција и интерстицијала) насталих приликом деформације. При даљем порасту температуре долази до нове расподеле дислокација проузрокованих било клизањем или дифузијом (пењањем) дислокација. Процеси којима се мења расподела дислокација основа су опорављања и у суштини се свode на полигонизацију. Дислокације случајно распоређене у деформисаном металу (сл. 2.2а) доводе до покретања атомских равни решетке. Преместе ли се дислокације тако да се образује правилна мрежа (сл. 2.2б) смањују се еластичне деформације равни, а тиме и слободна енергија метала. Прегруписавањем дислокација у деформисаном зрну настају блокови или субзрна чије се оријентације решетке незнатно разликују. Тада се микроструктура зрна може назвати субструктура зрна. Опорављање се испољава снижавањем унутрашњих напона деформисаног метала, променом физичких особина (нпр. смањењем електричног отпора) док се механичке особине битније не мењају (сл. 2.2в, почетни део).

2.1.2 Рекристализација

Рекристализација је процес, тј. појава која настаје при достизању одређене температуре у случају да је материјал претходно обликован до неког степена. У процесу рекристализације нестају почетно деформисана зрна и настају нова зрна чији се облик, величина и оријентација решетке разликују од почетних деформисаних зрна (сл. 2.2в). Густина грешака решетке се при том смањује на величину која одговара недеформисаном металу. Усвојено је да се структура сматра рекристалисаном кад она садржи 95% рекристалисаних зрна [4].

До рекристализације долази на одређеној минималној температури. Та температура није увек за дати метал константна; зависна је углавном од енергије међуатомских веза, степена претходне деформације и чистоће метала. Деловање тзв. енергије везе се одржава све до температуре топљења; што се јаче држе атоми метала у чворним тачкама решетке, тиме је већа топлота потребна за то да атом напусти своје место у решетки. Зато метали са вишом температуром топљења имају такође и вишу рекристалizacionу температуру.

Код чистих метала се обично даје веза између температуре топљења T_T и температуре рекристализације T_p у следећем облику: $T_p = (0.1-0.2) \cdot T_T$. Сличан принцип се може применити за:

- технички чисте метале као $T_p = (0.3 - 0.4) \cdot T_T$ и
- за легуре типа чврстог раствора као $T_p = (0.5 - 0.6) \cdot T_T$.

Тако су неке карактеристичне температуре рекристализације одређене према наведеним изразима: $T_p = 15-20^\circ\text{C}$ за олово (Pb), 20°C за цинк (Zn), $20-25^\circ\text{C}$ за калај (Sn), $180-230^\circ\text{C}$ за бакар (Cu) и око 350°C за месинг (Cu-Zn).

У неким случајевима својства пластичности метала могу се повећати а да се при томе незнатно смањи јачина. То се постиже жарењем при температури нижој од температуре рекристализације. Поступак се зове *подрекристалizacionо* жарење и користи за повратак еластичних особина бакарних опруга, мембрана, подметача и сл. Исти поступак се у великој мери користи и код легура Al и Mg.

Висина рекристалizacionе температуре има велики практичан значај, јер ојачање постигнуто пластичном деформацијом остаје задржано само ако је обрађен материјал изложен деловању температуре ниже него што је температура рекристалizacionе. Ако се пластична обрада одвија на вишим температурама ојачање се не појављује пошто се рекристалizacionа дешава истовремено са пластичном деформацијом; то значи да се ојачање изазвано деформацијом директно одстрањује истовременом рекристалizacionом. Као што је већ речено, температура рекристалizacionе најчешће представља границу прераде на хладно и прераде на топло.

Наведени изрази за везу између температуре топљења и температуре рекристалizacionе, за метале техничке чистоће, важи само за велику пластичну деформацију. На рекристалizacionу температуру утиче такође и степен претходне деформације; што је деформација била већа, тиме је и нижа температура довољна да

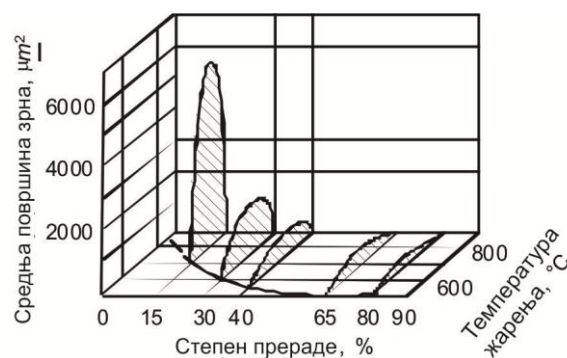
изазове рекристализацију. Обрнуто, ако степен деформације не достигне одређену вредност до рекристализације неће доћи. С обзиром на то да примесе отежавају померање дислокација у металу, такође отежавају и рекристализацију. Нпр. метали високе чистоће имају знатно нижу температуру рекристализације него метали техничке чистоће.

Процес рекристализације се може поделити на три етапе:

- 1) појава клица нових кристала и њихов раст,
 - 2) пораст дебљине кристала рекристалисаног метала и
 - 3) додатни раст неких кристала.
-
- 1) Клице нових кристала настају на местима са највећом слободном енергијом (нарочито на границама деформисаних зрна, на границама блока). Енергија потребна за њихов настанак је на тим местима најмања, а услови за нуклеацију најповољнији. Са порастом степена деформације број клица се повећава па је излазна структура рекристалисаног метала зато ситнозрнаста. Настали кристали имају исти састав и исти тип кристалне решетке као и околна основна деформисана маса, из које су се појавили. За разлику од фазних преображаја у чврстом стању (прекрстализације) при рекристализацији се не мења тип кристалне решетке. Ако се рекристалише α -гвожђе, задржава се његова просторно центрирана кубна решетка и после рекристализације, као што је била и пре ње.
- Раст заматака нових кристала наставља се на рачун деформисања основне масе, све док се нови кристали при свом расту не сусретну и настане нова структура зрна истих димензија у свим правцима.
-
- 2) Величина кристала после рекристализације има посебан значај за техничку праксу. Рекристализацијом се може добити веома фина структура и супротно веома груба структура. Највећи утицај на величину зрна рекристалисаног метала има претходни степен прераде. Са порастом степена прераде расте број области које су погодне за појаву клица што се испољава већим бројем клица и ситнијим кристалима после рекристализације. Супротно томе, при малом степену прераде појава клица је ограничена на мањи број области (настаје мали број клица), а кристали су после рекристализације груби. Такође, величина кристала полазне структуре пре пластичне деформације утиче на величину кристала после рекристализације. Ако је полазна структура грубозрнаста добиће се и грубљи кристали после рекристализације. Код ситно кристалне полазне структуре долази при истом степену прераде до већег пораста унутрашње енергије метала (гомилање дислокационих таласа на већим граничним површинама), што се испољава већим бројем заматака кристализације, односно ситнозрнастом структуром.



Слика 2.3 Утицај грубозрнате рекристализације на зарезну жилавост меког (нискоугљеничног) челика



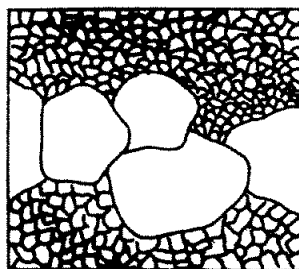
Слика 2.4 Рекристализациони дијаграм меког челика

Највећи пораст неких кристала при рекристализацији настају после мале пластичне деформације, углавном у границама 5 до 20% (сл. 2.3). Оваква деформација се означава као критична деформација, јер при потоњој рекристализацији настаје структура са необично грубим зрнима. Та тзв. крупнозрнаста рекристализација има веома неповољан утицај на механичке особине материјала. Јачина и тврдоћа се битно не мењају, али ударна жилавост опада готово на нулту вредност; материјал постаје веома крт (сл. 2.3). Пошто величина зрна после рекристализације знатно утиче на особине метала, корисно је познавати однос између степена деформације, температуре рекристализационог жарења и величине зрна после рекристализације. Тај однос се успоставља за дати материјал опитно и добијене вредности се уносе у тзв. рекристализациони дијаграм. Са рекристализационог дијаграма, нпр. за меки угљенични челик (сл. 2.4) одређује се за које степене деформације и при којим температурама долази до највећег пораста зрна. Рекристализациони дијаграм на тај начин садржи важне информације за избор услова прераде и накнадног рекристализационог жарења. До грубозрнате рекристализације не мора доћи, ако се материјал рекристализационо жари при довољно ниској температури или ако се прерађује интензивније него што одговара критичном степену деформације.

3. Супротно од легура у којима се обично одвија континуални пораст кристала, код чистих метала, нпр. код алуминијума или цинка, при рекристализацији је присутан неправилни-локални, или дисконтинуални пораст кристала. Тај додатни пораст, само неких кристала у рекристалисаној структури метала, назива се секундарна рекристализација. Резултат је појава неравномерне структуре, која се састоји из финозрне металне масе и неколико грубих зрна (сл. 2.5). У почетку пораст зрна је равномеран (примарна рекристализација), а затим настаје пораст неких зрна јер није било постигнуто потпуно равнотежно стање.

За постизање рекристалисане структуре најчешће се користи термичка обрада рекристализационог жарења. Овом типу жарења се подвргавају челици који су пластично обликовани у хладном стању и код којих је дошло до деформационог ојачавања, тј. до повећавања својстава чврстоће, а смањења пластичности.

Деформисана–оријентисана метална зрна поново добијају полигонални облик. После рекристализације материјал добија све почетне особине, које је имао пре обраде на хладно (мања јачина и тврдоћа, већа истегљивост и ударна жилавост). Понекад се чак постижу и повољније вредности неких својстава у односу на почетне као што је ударна жилавост. Рекристализационо жарење омогућује даљу прераду на хладно а некада се користи и између две операције обликовања при вишефазном обликовању. Нпр. при дубоком извлачењу, при ваљању трака, финих фолија или при вучењу жице материјал се између појединих редукција рекристализационо жари, чиме се одстрањује ојачање и омогућава даља пластична деформација.



Слика 2.5 Неравномерна структура после секундарне рекристализације

Сада када су познате предности врста обраде и појам рекристализације који се везује за обраду у топлотном стању, потребно је познавати и опсеге температура који дефинишу те обраде.

У табели 2.1 дате су емпијски одређене температуре рекристализације за поједине металне материјале, али се препоручује да температура обраде буде $T_{об} > 0.65T_T$, где је T_T – температура топљења метала.

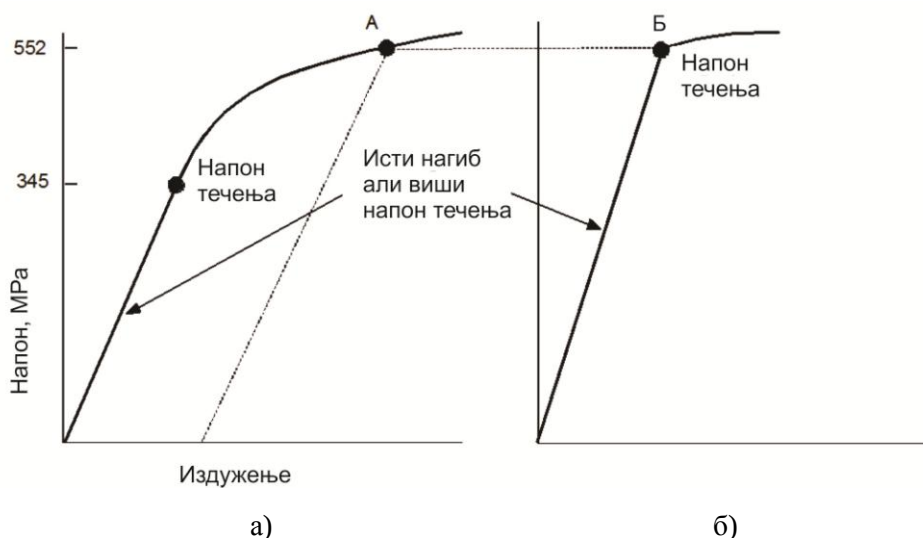
Табела 2.1 Температуре рекристализације

Температура рекристализације појединих метала, °C			
Волфрам (W)	1200	Месинг (Cu-Zn)	270
Гвожђе (Fe)	450	Алуминијум (Al)	150
Нелегирани челици	450 – 600	Калај (Sn)	0
Средње и високо легирани челици	600 – 800	Олово (Pb)	0

Такође, у зависности од врсте материјала, разликују се и времена загревања (жарења) на одређеној температури. Тако се време жарења за нискоугљеничне челике са 0.08–0.2%С и хладно ваљане лимове креће у опсегу од 8 – 12 h, док је за хладно ваљане профиле од високоугљеничних и легираних челика то време креће и креће се од 0.5 – 1.5 h.

2.3 Утицаји на деформационо ојачање и деформибилност

Појам деформибилности материјала се може дефинисати као способност материјала да се обликује до одређеног степена деформације а да се притом не појави прслина или разарање структуре материјала. С друге стране, деформационо ојачање материјала представља пораст напона течења за време трајања процеса пластичног деформисања. Феномен деформационог ојачања се може уочити на дијаграму напон-деформација у зони пластичних деформација за угљенични челик (сл. 2.6).



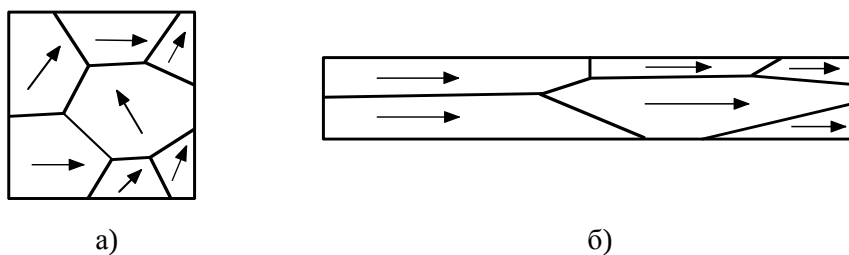
Слика 2.6 Ојачање челика на хладно

Овај феномен се може показати испитивањем челичне епрувете затезањем. На пример напон течења испитиваног челика је $R_{p0.2} = 345$ МПа и чврстоћа $R_m = 690$ МПа. Ако се на машини за испитивање затезањем (кидалици) шипка (епрувета) оптерети до напона $\sigma_A = 552$ МПа који лежи између границе течења и јачине R_m (сл. 2.6а) и затим шипка растерети и извади из чељусту машине и накнадно изложи затезању (сл. 2.6б) добиће се нов напон течења од 552 МПа уместо 345 МПа. У циљу објашњења овог феномена размотрићемо шта се догодило на нивоу кристалне решетке. Под дејством напона у зони пластичности ($\sigma > R_{0.2}$) настаје клизање у повољно оријентисаним равнинама, што доводи до образовања дислокација и њиховог кретања. Са порастом клизања долази до интеракције између дислокација, њиховог нагомилавања и укрштања. Оваква структура отежава поновно клизање. Другим речима, када је напон порастао до σ_A (сл. 2.6а) искоришћене су све равни и дислокациони положаји за лако клизање. То значи да при накнадно уведеном оптерећењу клизање може да започне у равнина које захтевају напон $\sigma > \sigma_A$. У физичком смислу дошло је до пораста границе еластичности и јачине зато што је блокирано кретање атома које условљава клизање [4].

Овај феномен назива се радно отврдњавање, деформационо ојачање или прерада на хладно (хладна обрада).

Са порастом степена деформације мења се такође облик зрна; почетна полиедарска зрна се издужују у правцу преовлађујуће деформације, а од њих затим настају веома издужена влакна са релативно малим попречним димензијама. У току пластичне

деформације мења се такође оријентација решетке у појединим зрнима; код недеформисаних зрна је оријентација зрна обично случајна (сл. 2.7а), а током деформације се мења у усмерену (сл. 2.7б). Поликристал се тако приближава монокристалу, али са веома великом густином грешки решетке. Усмерена оријентација мреже зрна понекад се такође означава као *текстура*. Према врсти прераде говоримо о ваљаној текстури, вученој текстури и тсл. Појава текстуре се одражава на знатну анизотропију особина поликристалних материјала; нпр. после ваљања на хладно знатно се разликују особине лима у правцу ваљања и у управном правцу.



Слика 2.7 Оријентација решетке и облик зрна: а) недеформисани систем, б) деформисани систем

Посебна карактеристика промене субмикроструктуре после пластичне деформације јесте пораст густине грешака. Са порастом степена деформације повећава се густина дефеката, расте отпор против даље деформације, повећава се напон потребан за даљу деформацију, то значи да расте напон течења. Слично као и напон течења, расту такође јачина на кидање и тврдоћа; напон течења расте брже него јачина па се ове величине са порастом степена деформације међусобно приближавају (однос P_m/P_e тежи јединици). Својства пластичности се погоршавају и такође жилавост опада. Наведена промена механичких особина, као што је поменуто назива се *деформационо ојачање*. Повећање својстава отпорности, које се може постићи пластичном деформацијом се у техничкој пракси релативно често користи. Поред жарених материјала испоручују се и материјали ојачани *прерадом на хладно*. То су нпр. жице, шипке, траке, лимови, цеви или профили, код којих се према степену деформисања разликују полутврдо, тврдо, еластично тврдо стање и др.

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

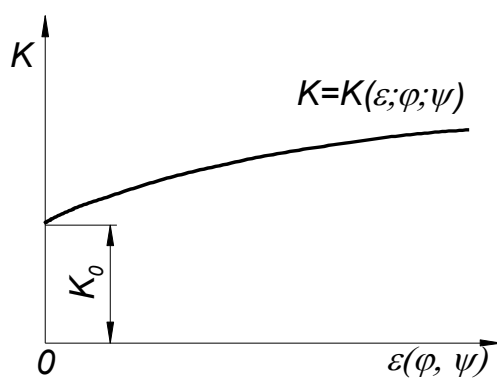
Ефекат ојачања зависи од:

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

Најбољи начин за квантификовање деформационог ојачања је одређивање кривих течења или кривих ојачања (сл. 2.8). Оне представљају зависност напона течења, односно деформационог отпора (деформационе чврстоће) од остварене еквивалентне

(ефективне) пластичне деформације. Док процес пластичног деформисања траје, деформациони отпор је једнак еквивалентном напону, према енергетском услову пластичности. Треба напоменути да у општем случају напрезања еквивалентни напон може да буде и мањи од деформационе чврстоће која представља критични напон потребан да се оствари трајно деформисање.

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



Слика 2.8 Крива ојачања

Као што је већ наглашено, шире посматрано, деформациони отпор зависи од:

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

Са повећањем брзине деформације ($\dot{\varphi}$) расте и деформациони отпор (K). На вишим температурама, утицај брзине деформације на деформациони отпор је већи него на нижим температурама, пре свега због структурних појава везаних за процес рекристализације. При повећању $\dot{\varphi}$ преостаје мање времена за рекристализацију, па ће деформациони отпор расти према сл. 2.7.

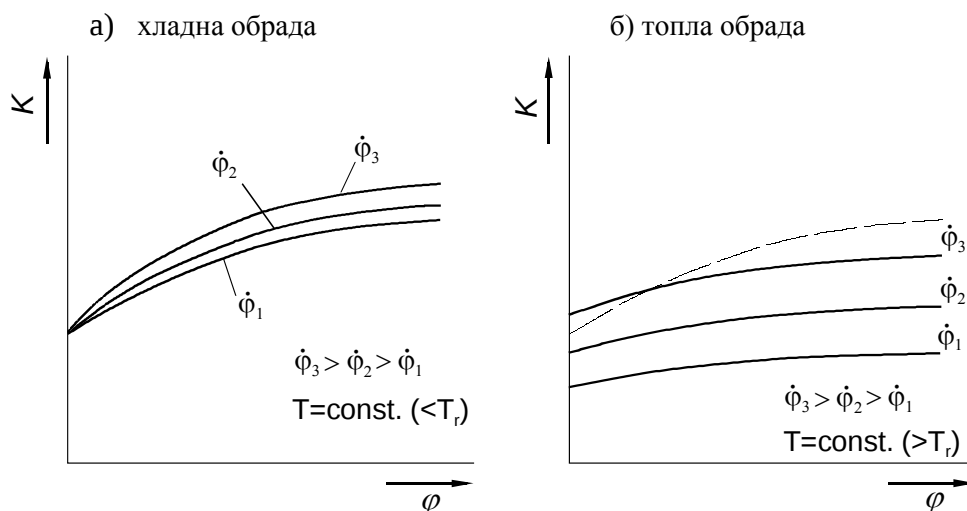
Експерименталним испитивањима је утврђено да се на $T=20^\circ\text{C}$ при повећању $\dot{\varphi}$ за 10 пута у односу на брзине лабораторијских машина ($0,004 - 0,008 \text{ s}^{-1}$), K повећава за 5-10%. При повећању $\dot{\varphi}$ за 1000 пута, K се повећава за 16-34%. Међутим, при топлој обради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

Испитивања су показала да важи однос:

$$\frac{K}{K_0} = \left(\frac{\dot{\varphi}}{\dot{\varphi}_0} \right)^m \quad (2.1)$$

K , K_0 – деформационе чврстоће при брзинама $\dot{\phi}$ и $\dot{\phi}_0$, m – брзински коефицијент који зависи од врсте материјала и температуре процеса деформисања ($m \approx 0,1 - 0,22$ за топлу обраду).

При хладној обради (температура процеса обликовања T мања је од температуре почетка рекристализације T_p) доминира утицај степена деформисања (сл. 2.9 а). При топлој обради утицај брзине деформације је израженији (сл. 2.9 б).



Слика 2.9 Утицај степена деформације, брзине и температуре на деформациони отпор

С друге стране, на деформабилност материјала такође утиче велики број фактора и то:

- врста материјала и димензије полуфабриката,
- деформационо ојачавање и анизотропија,
- историја деформисања,
- температуре и брзина деформисања,
- триболошки фактори,
- распоред деформација,
- почетни дефекти у материјалу и др.

Деформабилност се може представити и дијаграмима граничне деформабилности који показују максималне вредности деформације које неки материјал може остварити у одређеним условима.

3. ТОПЛО КОВАЊЕ УГЉЕНИЧНИХ ЧЕЛИКА

Ковање је поступак запреминског обликовања метала и изводи се између два калупа који су у релативном кретању, при чему се материјал излаже притискујућим и затежућим напонима у условима већих брзина. Ковање врло често прати и ударно дејство радних делова машине. Ударним дејством се постиже лакше обликовање материјала али и могућност за попуњавање сложених облика гравуре у горњој половини алата због присуства инерцијалних сила.

Као што је већ речено, ковање може да се изведе на хладно и топло. Међутим, како обрада на топло има низ предности као што су: мањи деформациони отпор и повећана пластичност материјала који се кује, може се рећи да је ковање на топло доминантно. Код ковања на топло материјал се загрева изнад температуре рекристализације, а режим загревања се дефинише у зависности од материјала. Режим загревања треба да дефинише брзину загревања и дужину прогревања на датој температури. На тај начин се омогућава лакше попуњавање гравуре у алату.

Историјски посматрано, ковање је најстарији начин обликовања метала, али тек у последња два века се интензивно користи у индустрији. Од свих типова ковања, најзаступљенија је обрада ковања на топло док се хладно и полутопло ковање ређе користе.

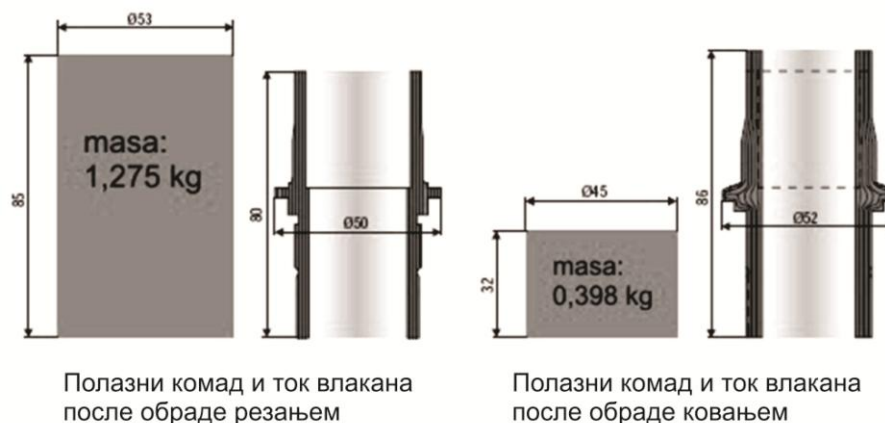
Ковање се изводи на различитим типовима машина и сам процес ковања у великој мери зависи од врсте машине на којој се изводи. Најзначајнија су два типа машине за ковање: ковачки чекићи и ковачке пресе. У оба случаја (осим за слободно ковање) потребни су одговарајући алати – ковачки калупи.

Основна особина процеса обликовања је поступност у извођењу операција, тзв. фаза. Постоје три фазе процеса:

- припремно,
- претходно и
- завршно ковање.

У свакој фази најчешће се реализује по једна операција чиме и део који се кује (полуфабрикат) добија одређени облик. Поступност у извођењу процеса омогућава постепено обликовање дела на коначну геометрију и димензије.

Ковање има одговарајуће предности у односу на технологије промене облика комада које не спадају у области пластичног обликовања. Те предности се огледају пре свега у погледу механичких и структурних особина радног комада. Наиме, ковање омогућава очување непрекидне влакнасте структуре материјала што даље доводи до значајних предности. Коване делове одликује много већа динамичка издржљивост делова према механичким оптерећењима у односу на алтернативне технологије, нпр. технологију обраде метала резањем. Такође, оваквим поступцима обликовања се постиже и економичнија и рационалнија употреба материјала што се може приказати примером на слици 3.1.



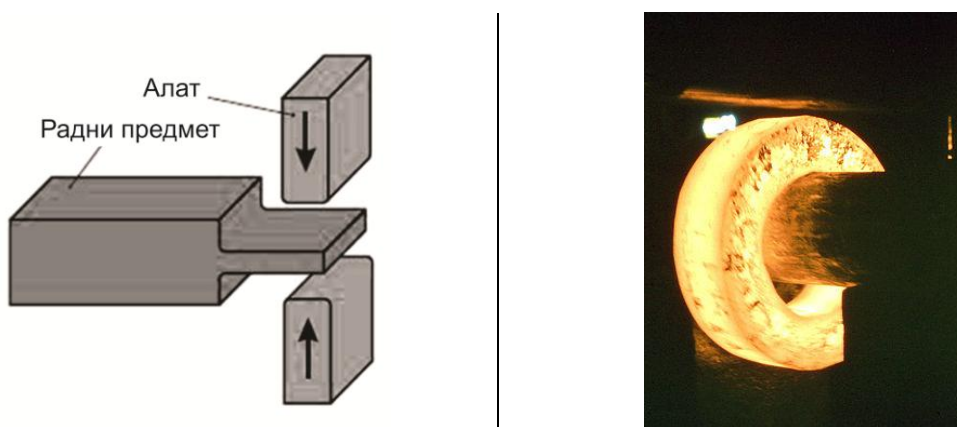
Слика 3.1 Поређење добијања истог комада на два начина (технологијом ковања и резања)

У техничком смислу разликују се два вида ковања:

- а) слободно ковање и
- б) ковање у алатима (калупима).

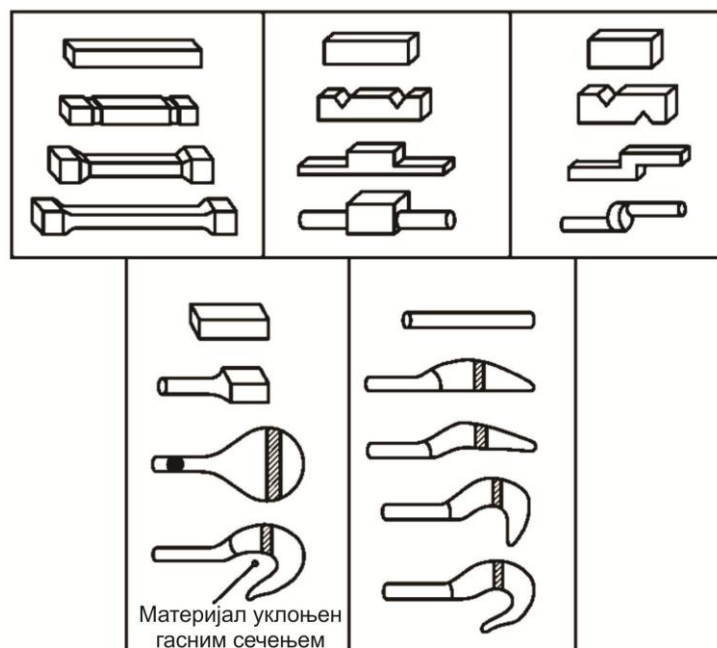
3.1 СЛОБОДНО КОВАЊЕ

Слободно ковање се изводи на одговарајућим машинама уз помоћ једноставнијег универзалног алата, најчешће понављањем операције слободног сабијања (сл. 3.2). Примењује се у појединачној и малосеријској производњи, али и као припремна операција за вишефазно ковање у калупима. Овај вид ковања је једина технологија обликовања делова веома великих димензија (вратила великих бродских мотора, вратила пропелера великих бродова, делови великих машина у жељезарама итд.), када се за манипулацију и премештање радних предмета користе специјални манипулатори за држање и окретање комада при ковању. Такође, врло често је неопходно изводити и више грејања комада јер долази до њиховог захлађивања што даље отежава процес обликовања.



Слика 3.2 Схематски приказ слободног ковања (лево) и слободно ковање прстена (десно)

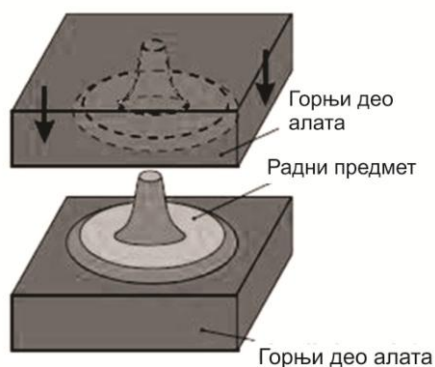
На слици 3.3 су приказани карактеристични примери отковака добијених слободним ковањем.



Слика 3.3 Примери предмета обликованих слободним ковањем

3.2 КОВАЊЕ У КАЛУПИМА (АЛАТИМА)

Ковање у алатима или калупима се изводи у дводелним алатима – калупима при чему је доњи део алата (доњи калуп) по правилу непокретан и учвршћен за постоље машине – ковачког чекића или пресе. У калупима се израђује шупљина (тзв. гравура) која потпуно одговара загрејаном отковку по облику и димензијама. Геометрије отковака могу да буду различите, од релативно једноставних, до веома сложених и од веома малих до релативно великих. Величина отковака зависи од могућности машине и величине алата. Отковци се најчешће израђују од челика, али се користе и обојени метали и њихове легуре.



Слика 3.4 Ковање у калупу: схематски приказ (лево) и ковање новчића у калупу (десно)

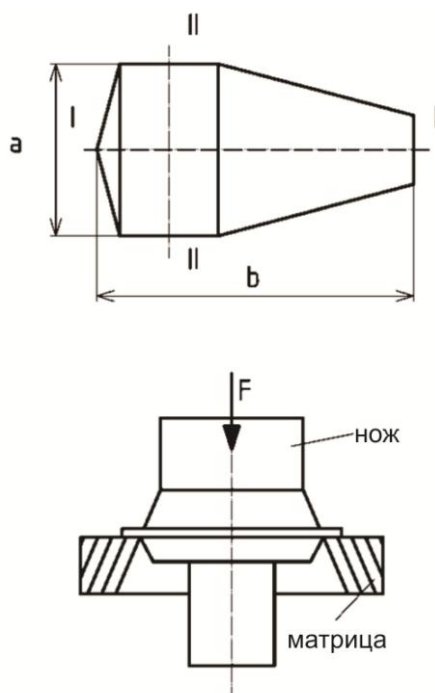
3.3 ДЕФИНИСАЊЕ ГЕОМЕТРИЈЕ ОТКОВКА

Полазна основа за дефинисање геометрије отковка је конструктивни цртеж дела спремног за уградњу. Геометрија отковка се увек мање или више разликује, и да би се правилно дефинисала треба познавати технологију ковања и накнадну обраду. Да би се дефинисала геометрија отковка као основа за пројектовање алата и технологије ковања, потребно је одредити:

- а) положај и облик подеоне површине (површине раздвајања),
- б) величину додатака за обраду и ковачке толеранције,
- в) ковачке нагибе и радијусе заобљења,
- г) површине за ослањање (базне површине),
- д) облик и димензије плочица на местима отвора.

Целокупна гравура која одговара мерама загрејаног отковка дели се на два дела подеоном површином. Истовремено, она дели алат на горњи и доњи калуп. По подеоној површини формира се венац при завршном ковању. При избору положаја ове површине мора се обезбедити неометано раздвајање калупа и вађење отковка из калупа, као и поуздано попуњавање гравуре.

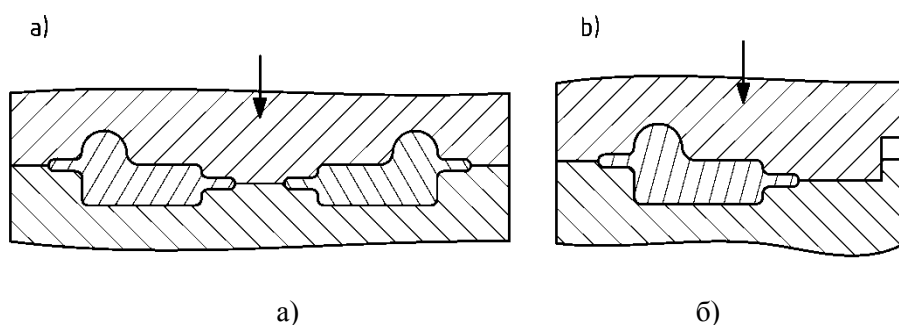
По правилу се подеона површина поставља у равни веће мере, према примеру на сл. 3.5 (раван I-I). У овом случају је олакшано испуњавање гравуре, али је сложенији алат за опсецање венца. У случају када је подела калупа у равни II-II, нешто је теже попуњавање гравуре, али је алат за опсецање једноставан (контура раздвајања је кружна).



Слика 3.5 Могућности за положај подеоне равни и схема опсецања венца за случај подеоне равни II-II

Као што је већ споменуто, при ковању на чекићу треба страну са сложенијом геометријом поставити у горњи калуп због постојања инерцијалних сила за време ковања.

Током ковања није дозвољено релативно померање горњег и доњег калупа у хоризонталној равни. Због тога се при ковању несиметричних отковака врши уравнотежавање бочних сила постављањем два отковка (сл. 3.6 а) или изградом алата са бочним ослонцем (сл. 3.6 б).

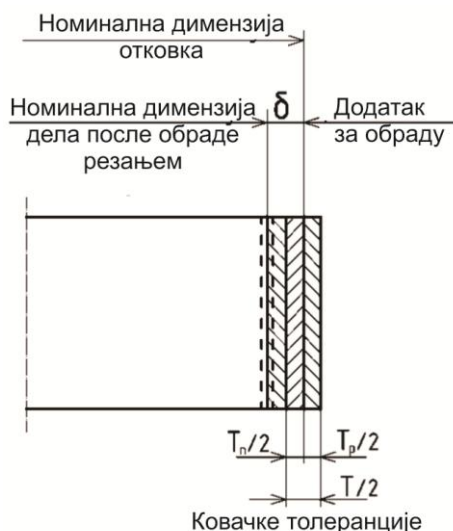


Слика 3.6 Уравнотежење хоризонталних сила при ковању

После топлог ковања увек следи накнадна дорада резањем. Због тога се при одређивању мера отковака, поред ковачких толеранција, мора узети у обзир додаток за обраду (сл. 3.7). Он укључује микропрслине, разугљеничење и друге дефекте, као и одступање геометријског облика површина, димензијска одступања итд.

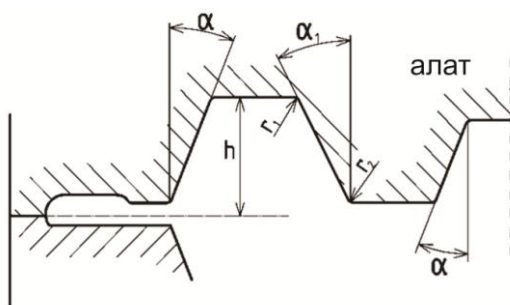
Ковачке толеранције дефинишу толерантно поље отковка које укључује сва одступања од његових номиналних димензија из следећих разлога: нетачност ковања по висини, непотпуно испуњење завршне гравуре, кривљење осе, ексцентричност при пробијању плочице итд.

Величине додатка за обраду и ковачких толеранција дају се у одговарајућим емпиријским препорукама, у зависности од димензија, конфигурације отковка, врсте материјала, масе отковка итд.



Слика 3.7 Схематски приказ ковачких толеранција и додатака за обраду

Ковачки нагиби и заобљења имају двоструку улогу: олакшавање вађења отковка из гравура и смањивање отпора при течењу загрејаног метала. Ковачки нагиби подразумевају да бочни зидови гравуре буду закошени. Потребно је да унутрашњи углови буду већи од спољашњих (сл. 3.8), како при потхлађењу не би дошло до притезања унутрашњих испупчења гравуре радним комадом.



За ковање на чекићу:

$$\alpha_1 = 9^\circ$$

$$\alpha = 6^\circ$$

За ковање на преси:

$$\alpha_1 = 6^\circ$$

$$\alpha = 3^\circ$$

Слика 3.8 Нагиби и заобљења у алату за ковање

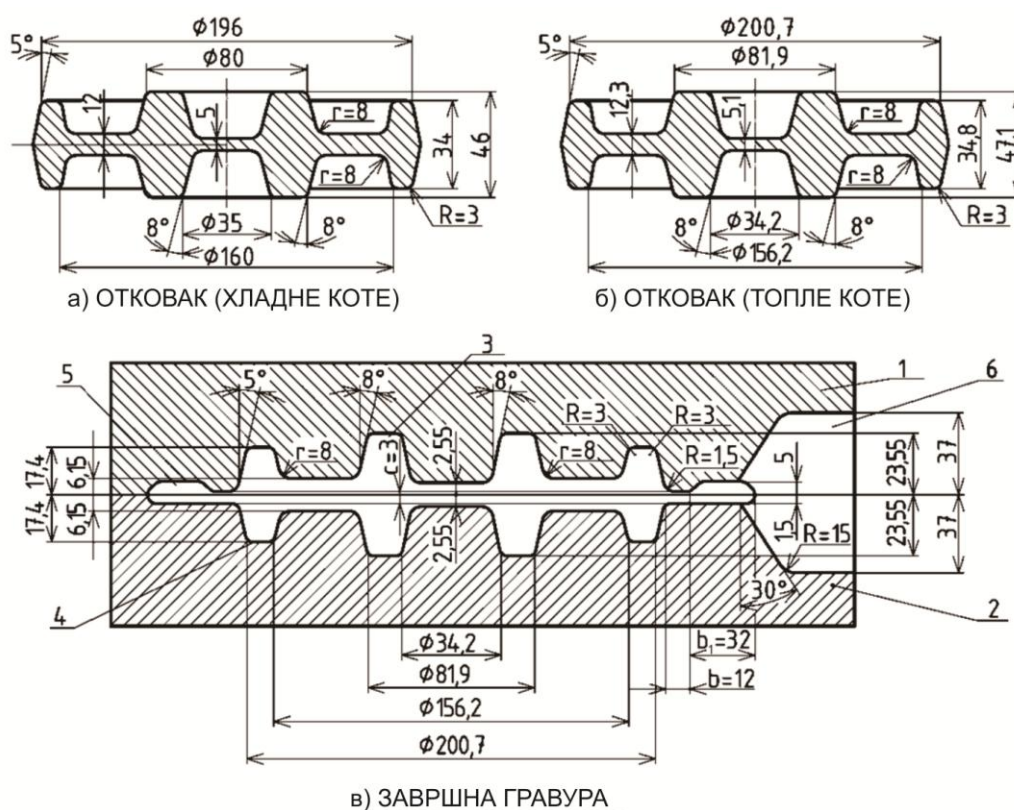
У циљу лакшег попуњавања калупа и смањења хабања алата све ивице отковка, односно одговарајуће гравуре, морају бити заобљене. Величине радијуса се бирају из препорука, најчешће у зависности од дубине гравуре.

Пошто се увек после ковања изводи дорада у циљу добијања тачних мера и одговарајућих квалитета површина, потребно је дефинисати базне површине на отковку. Оне се одређују још у фази конструкције отковка, да би комад био што стабилнији при стезању у првој операцији резања при доради. По правилу то су површине које не зависе од хабања гравуре у калупу. Није повољно да то буду површине управне на ход калупа или уске, мале површине на које лако утиче хабање гравуре. Често се код сложених несиметричних отковака уводе посебни додаци за успешно стезање у првим операцијама дораде резањем.

При ковању није могуће непосредно добити отворе на комаду. Конструкцијом гравуре на месту отвора формирају се удубљења између којих остаје тзв. плочица, т.ј. добија се слепи отвор. Потпуни отвор се постиже накнадним пробијањем током операције тзв. крзања. Плочица може имати различит облик (раван, сочиваст итд.), а димензије се усвајају према препорукама.

Полазна основа за формирање геометрије отковка је конструктивни цртеж комада спремног за уградњу, односно механички потпуно обрађеног. Уз уважавање претходно изнетих специфичних захтева везаних за технологију ковања формира се цртеж отковка.

Пример геометрије отковка је дат на слици 3.9 а. Димензије на овом цртежу (хладне мере) треба кориговати због загревања. Спољашње мере се повећавају, а унутрашње смањују. Тако се добијају димензије отковка на температури обраде, тзв. топле мере (слика 3.9 б). На основу ових мера димензионише се завршна гравура у калупима (сл. 3.9 ц).



Слика 3.9 Пример геометрије отковка

Такође, веома важна карика у целокупном процесу прописивања и извођења процеса ковања јесте материјал који се кује и материјал од ког је израђен ковачки алат. Када је реч о челицима као најпримењиванијим материјалима, ковањем се могу обликовати готово све врсте челика али се мора водити рачуна о врсти челика. Најједноставније је ковање угљеничних челика због ниског деформационог отпора и релативно добре пластичности али је са друге стране веома тешко ковати високолегирани челике.

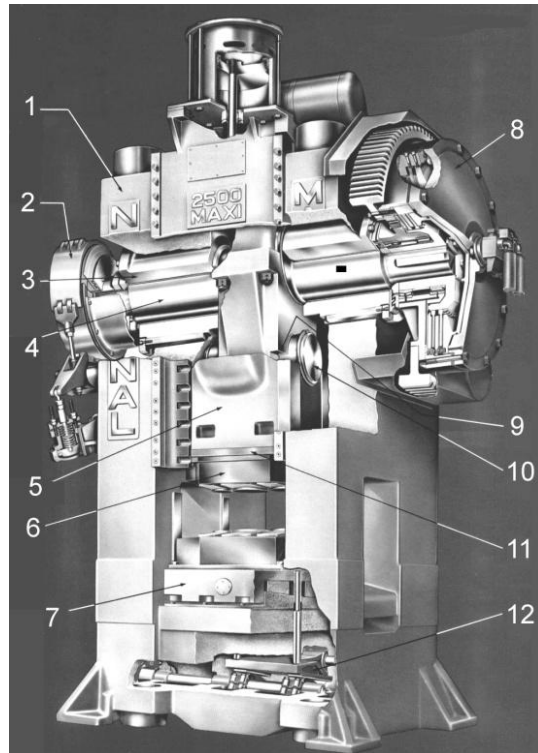
Такође, када је реч о челицима за израду ковачких алата, они се готово увек израђују од висококвалитетних легираних челика за рад на топло.

Табела са челицима који се користе за ковање и челицима за израду ковачких алата је дата у Прилогу овог рада.

3.4 КОВАЊЕ НА МЕХАНИЧКИМ КОВАЧКИМ ПРЕСАМА

Ковање на ковачким пресама (сл. 3.11) је мирније, брзином обично до 0,5 m/s. Гравуре се боље попуњавају у хоризонталним правцима. Свака гравура има одвојен, независан, калуп (сегмент). То је велика предност јер у случају оштећења постоји могућност замене само једног сегмента за разлику од калупа за ковање на чекићу где је цео алат израђен у једном, монолитном, блоку. Контакт горњег и доњег калупа није дозвољен.

Схематски приказ механичке кривајне ковачке пресе је дат на слици 3.11. Приказана машина је веома честа у ковачким погонима.

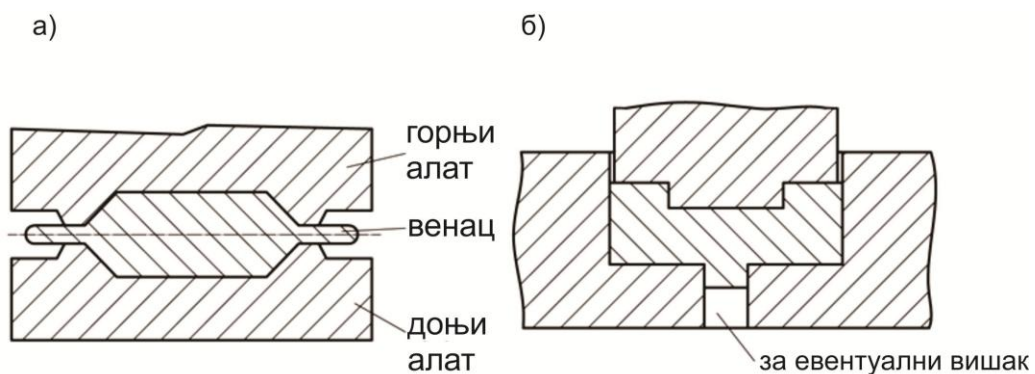


Слика 3.11 Механичка ковачка преса

Позиције на слици 3.11 су следеће: 1-рам пресе, 2-кочница, 3-клизни лежај, 4-главно вратило, 5-притискивач пресе, 6-горњи калупи, 7-радни сто, 8-спојница, 9-кривајна полуга, 10-осовиница, 11-плоча, 12-механизам избацивача.

Постоје два основна типа ковања у калупима:

- а) ковање са венцем или ковање у тзв. отвореним алатима, слика 3.12а и,
- б) ковање без венца или ковање у тзв. затвореним алатима, слика 3.12б.

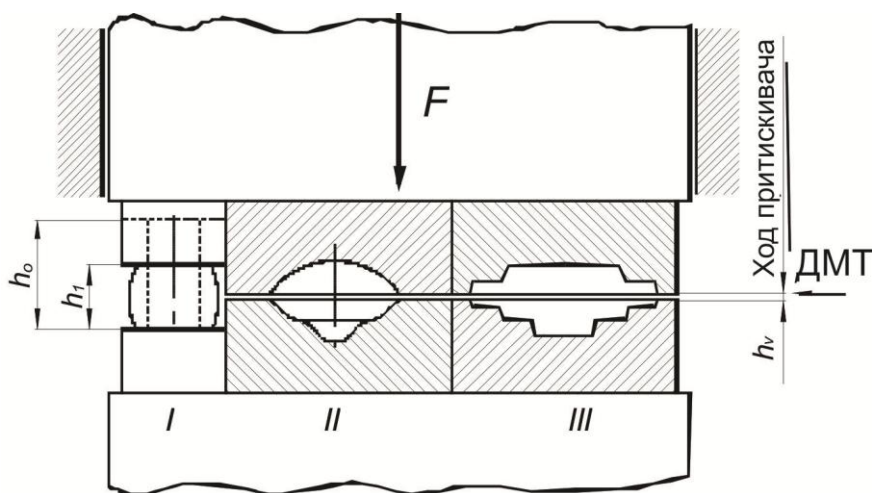


Слика 3.12 Ковање у отвореним (а) и затвореним (б) калупима

Ковање у отвореним алатима (ковање са венцем) подразумева већу запремину полазног комада у односу на готов отковак. Вишак после попуњавања гравуре излази ван и формира венац, сл. 3.12а. Овај тип ковања је најчешћи јер се њиме производи преко 90% случајева откованих производа.

Ако је запремина полазног комада приближно једнака запремини готовог отковка, реч је о ковању у затвореним алатима. У том случају не постоји венац, тј. вишак материјала. Предност оваквог ковања је у мањој накнадној доради и уштеди у материјалу али постоје отежавајуће околности: мања трајност алата, нестабилност висине отковка итд. Често се уводи компензациони отвор који прима евентуални вишак запремине (сл. 3.126).

Код ковачке пресе, концепција ковачких алата је другачија. Свака операција ковања, односно свака гравура, смешта се у одвојен, независан, пар калупа. На тај начин се омогућава лака и брза замена похабане или оштећене гравуре. Такође, на преси се прецизно дефинише ход притискивача (са горњим калупима) и не дозвољава контакт горњих и доњих калупа. Најмањи зазор између калупа је заправо висина венца за завршно ковање. На слици 3.13 дат је положај три пара калупа за ковање осносиметричног отковка на преси. Приказан је тренутак кад је кривајни механизам пресе у тзв. доњој мртвој тачки (ДМТ), односно кад притискивач пресе заузима крајњи доњи положај.



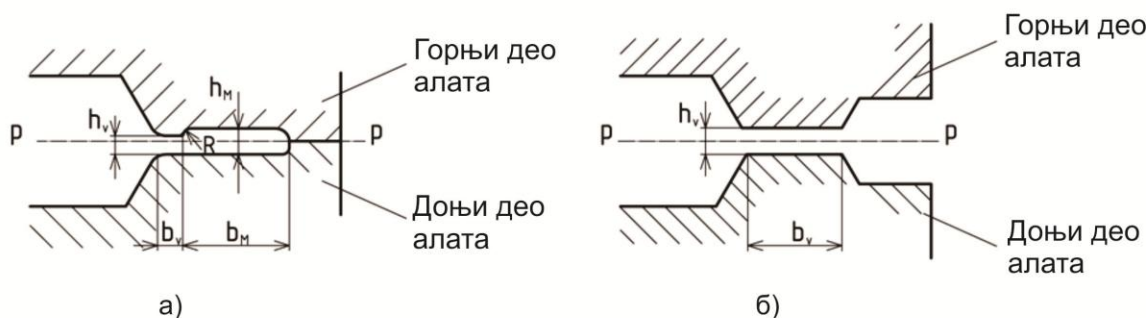
Слика 3.13 Положај калупа на ковачкој преси

Код ковања у отвореним калупима венац је свакако основно обележје. Формира се при завршном ковању и његова улога обухвата следеће:

- прима вишак материјала,
- ствара потребан отпор бочном истицању метала и омогућава потпуно испуњавање гравуре,
- при ковању на чекићима ублажава директан судар горњег и доњег калупа.

Геометрију венца није могуће унапред тачно дефинисати јер она варира зависно од запремине полазног комада. Међутим геометрија канала за венац се прецизно дефинише у завршним гравурама и разликује се на калупима за ковање на чекићу и пресама. Детаљни изглед канала за венац који се најчешће користе дат је на сл. 3.14. Геометријске величине канала за венац се бирају из одговарајућих препорука, зависно од димензија и сложености отковка. Најважније величине су висина h_v и ширина b_v тзв. моста.

Код ковања на чекићу долази до судара калупа у завршним ударцима, тако да венац има ограничен затворен простор за ширење. Због тога је веома важно правилно димензионисање тог простора. Код ковања на преси, није дозвољен контакт калупа. Најмање растојање између калупа се прецизно подешава и оно, заправо, одговара висини канала за венац x_B . Очигледно, код пресе нема бојазни од недовољне запремине простора за ширење венца.



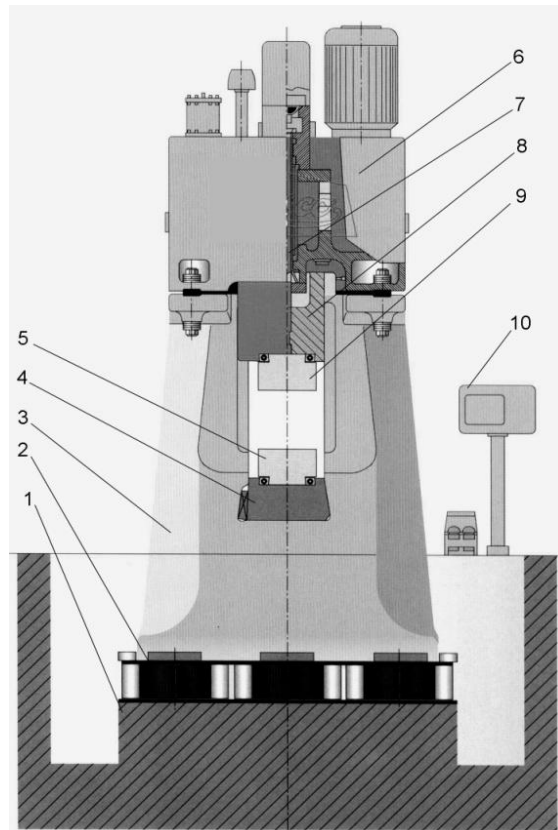
Слика 3.14 Канали за венац при ковању на чекићу (а) и преси (б)

Загревање комада пре ковања најчешће се врши у пламеним пећима (гасна или течна горива) или у електричним пећима. Први начин је економски најоправданији али доводи до стварања оксидне коре веће дебљине. Због тога се пре ковања мора обезбедити скидање тврде и потенцијално опасне оксидне коре. Због ударног дејства при ковању на чекићу кора се успешно скида током припремног ковања, односно сабијања. Загревање у електричним пећима је скупље, али практично обавезно јер је оксидна кора знатно тања и није сметња при неударном начину рада пресе.

Правилно загревање подразумева металуршку анализу и правилно дефинисање режима загревања (температуре, брзина, време прогревања итд.). Најчешћи температурски опсег за челичне комаде је од 900°C до 1100°C .

3.5 КОВАЊЕ НА КОВАЧКИМ ЧЕКИЋИМА ДВОСТРУКОГ ДЕЈСТВА

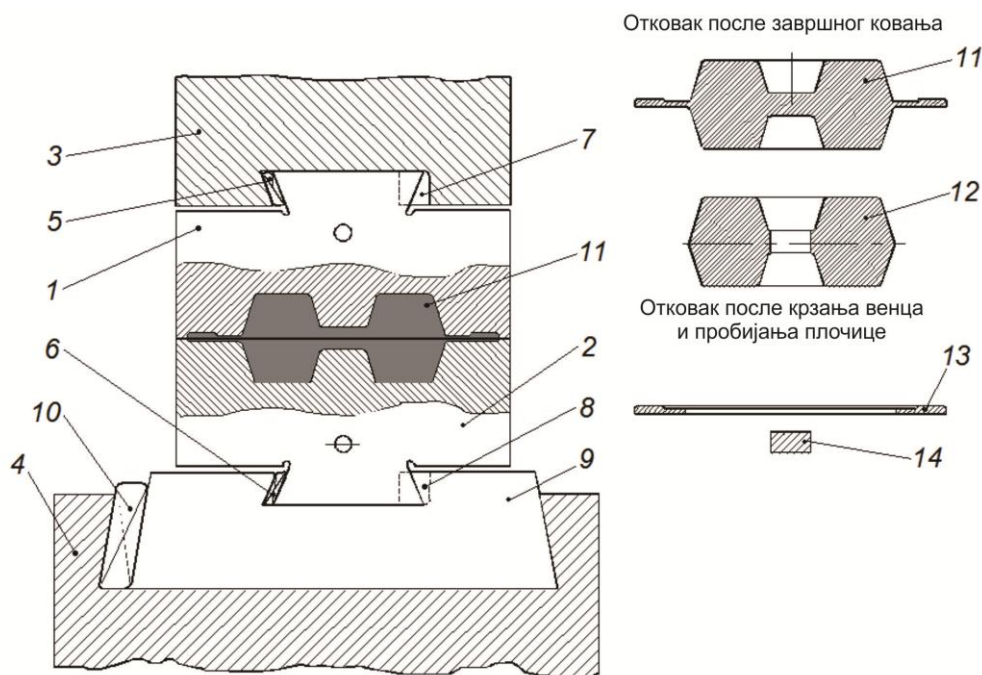
Врста ковачке машине суштински одређује процес обликовања и карактеристике алата. Код ковања на ковачким чекићима (сл. 3.15), користи се динамичко – ударно дејство падајућих маса (бата или маља са горњим калупом), брзином која је често изнад 10 m/s . Због инерцијалних сила боље је попуњавање гравуре горњег калупа. Калупи су једноделни (монолитни) и у њима су смештене све потребне гравуре у складу са потребном поступном променом облика. На слици 3.15 дат је схематски приказ ковачког чекића са следећим позицијама: 1-темељ машине, 2-амортизери вибрација, 3-рам, 4-наковањ, 5-доњи калуп, 6-погонски систем машине, 7-главни клип, 8-бат (маљ), 9-горњи калуп и 10-командна конзола.



Слика 3.15 *Схема савременог ковачког чекића са електрохидрауличним погоном*

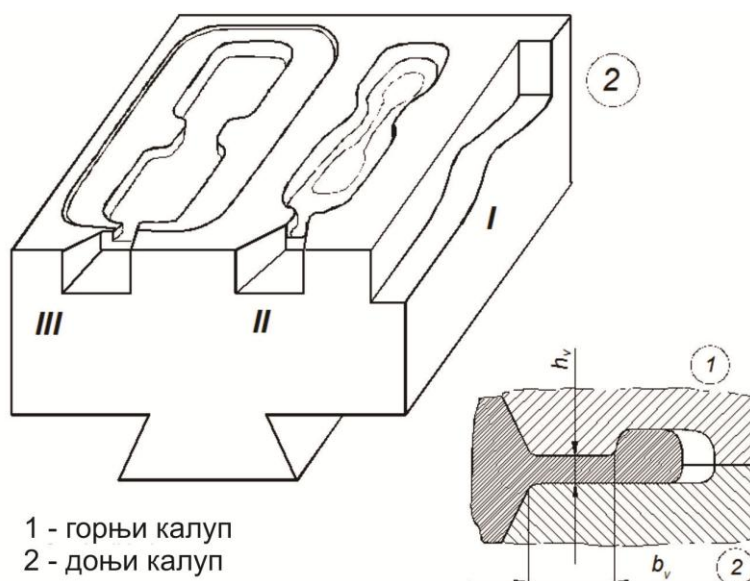
Типична схема диспозиције алата за ковање на ковачком чекићу приказана је на слици 3.16. У пресеку калупа види се завршна гравура у тренутку судара горњег (позиција 1) и доњег (2) калупа. Отковак има оносиметричну, ротациону форму са отвором на средини (12). Позиција 11 показује отковак после операције завршног ковања. Отковак има венац и тзв. плочицу на месту отвора. Ова два елемента су кључна код ковања у отвореним калупима. Венац се формира од вишка запремине после потпуног испуњавања завршне гравуре, а плочица испуњава место отвора и тиме знатно олакшава течење загрејаног метала и квалитетније испуњавање гравуре. Опсечени венац и пробијена плочица означени су позицијама 13 и 14.

Веза калупа са батом (3) и наковњем (4) машине изводи се робусном везом – тзв. ластиним репом. Осигурање је клиновима (5) и (6), а центрирање центрирачима (7) и (8). Веза са наковњем није директна него се изводи преко носача (9), који се осигурава клином (10).



Слика 3.16 Положај калупа за ковање на ковачком чекићу

Како је већ поменуто, калупи за ковање на чекићима су монолитни. То значи да су гравуре за све операције смештене у два једноделна калупа. Положај три гравуре у доњем калупу за отковак издужене форме дат је на слици 3.17.



Слика 3.17 Доњи калуп алата за ковање на ковачком чекићу и детаљ венца (десно)

На слици 3.14 виде се три гравуре, што значи да у свакој фази ковања (припремно, претходно, завршно) постоји по једна операција. Занимљива је прва операција (припремно ковање) која се изводи слободним ковањем из више удараца са циљем смањивања попречног пресека на средини полазног комада. Гравура је веома једноставна и има само једно испупчење.

4. ОДРЕЂИВАЊЕ ПАРАМЕТАРА ЗА ИЗБОР МАШИНЕ НА КОНКРЕТНИМ ПРИМЕРИМА

Одређивање параметара ковања је један од кључних корака у пројектовању технологије за израду дела. Као најбитнији параметри код ковања се издвајају сила ковања на пресама и маса падајућих делова чекића. Ови параметри се могу израчунати према одговарајућим емпиријским формулама и то:

Сила ковања за отковке са кружном пројекцијом у подеonoј равни:

$$F = 8(1 - 0,001 \cdot D) \left(1,1 + \frac{20}{D}\right)^2 \cdot A \cdot R_{m(t)}, \text{ N}; \quad D, \text{ mm}; \quad R_{m(t)}, \text{ N} \quad (4.1)$$

Сила ковања за неокругле отковке:

$$F = 8(1 - 0,001 \cdot D_n) \left(1,1 + \frac{20}{D_n}\right)^2 \left(1 + 0,1 \cdot \sqrt{\frac{L}{B_{sr}}}\right) \cdot A \cdot R_{m(t)}, \text{ N} \quad (4.2)$$

Номинални пречник фиктивног округлог отковка са истом површином као посматрани неокругли отковак:

$$D_n \approx 1,13 \cdot \sqrt{A}, \text{ mm}$$

Средња ширина отковка, аналогно ковању на чекићима:

$$B_{sr} = \frac{A}{L}$$

A је површина пројекције отковка у подеonoј равни, а L највећа дужина (габарит) пројекције.

Маса падајућих делова чекића за отковке са кружном пројекцијом у подеonoј равни:

$$m = (1 - 0,005 \cdot D) \left(1,1 + \frac{2}{D}\right)^2 (0,75 + 0,001 \cdot D^2) D \cdot R_{m(t)}, \text{ kg} \quad (4.3)$$

У изразу 4.3 вредност пречника D треба унети у см да би се добила вредност у kg.

Маса падајућих делова чекића за неокругле отковке:

$$m_n = m \left(1 + 0,1 \cdot \sqrt{\frac{L}{B_{sr}}}\right) \quad (4.4)$$

У претходном изразу m је маса падајућих делова за округле делове по изразу (4.4), при чему се уместо пречника D користи пречник фиктивног отковка према следећем изразу:

$$D = D_n = 1,13 \cdot \sqrt{A}, mm \quad (4.5)$$

A је површина пројекције отковка на раван управну на правац кретања калупа. Средња ширина отковка:

$$B_{sr} = \frac{A}{L}, mm \quad (4.6)$$

Детаљно извођење наведених израза се може наћи у одговарајућој литератури [2].

Изрази (4.1) и (4.3) дају добре резултате за пречнике отковака до око 300 mm. Нпр. ако се према изразу 4.1 одреди сила ковања за отковак пречника $D = 980$ mm и затезне чврстоће на температури ковања $R_{m(t)} = 60$ МПа, добиће се вредност 9,1 MN. Добијена вредност је нереална, вишеструко мања од потребне силе за ковање овако великог отковка. Због тога се се у литератури често дају дијаграми за одређивање силе или енергије ковања зависно од величине отковка и чврстоће материјала. Ти дијаграми се најчешће добијају емпиријским путем или добијају од стране произвођача ковачких машина.

У овој глави рада ће бити изложен прорачун параметара ковања за избор машине (пресе и чекића) на конкретним деловима. Приказан је прорачун за округле и неокругле отковке одређених пречника и димензија. Параметри који су били израчунавани су сила ковања код ковачке пресе и маса падајућих делова код ковачког чекића.

Циљ овог прорачуна је био да се одреди опсег важења постојећих емпиријских и литературних израза за израчунавање наведених параметара, тј. да се одреде граничне димензије дела до којих постојеће формуле могу дати поуздане резултате.

4.1 ПРИМЕРИ КОВАЊА НА МЕХАНИЧКИМ КОВАЧКИМ ПРЕСАМА

Прорачун је подразумевао израчунавање силе ковања F за две групе отковака чије су димензије дате у табели 4.1.

Табела 4.1 Димензије конкретних примера

Осносиметрични делови				
Пречник, mm	100	250	400	900
Висина, mm	100	110	150	250
Неокругли делови				
Габарити у подеоној равни, mm	50×200	100×400	200×600	600×900
Висина, mm	100	110	150	250

Затезна чврстоћа материјала отковка у хладном стању је $R_{mhl} = 600 \text{ MPa}$, а температура ковања је $t_k = 1100^\circ\text{C}$. Из одговарајуће литературе [1] је усвојено да је затезна чврстоћа материјала отковка на датој температури 54 MPa .

Сила ковања за осносиметрични отковак пречника 100 mm .

Полазни подаци: $R_{m(hl)} = 600 \text{ MPa} \rightarrow R_{m(t)} = 54 \text{ MPa}$; $t = 1100^\circ\text{C}$;
 $D = 100 \text{ mm}$

$$A = \frac{D^2\pi}{4} = \frac{100^2\pi}{4} = 7854 \text{ mm}^2$$

Прорачун:

$$F = 8 \cdot (1 - 0.001 \cdot D) \left(1.1 + \frac{20}{D}\right)^2 \cdot R_{m(t)} \cdot A$$

$$F = 8 \cdot (1 - 0.001 \cdot 100) \left(1.1 + \frac{20}{100}\right)^2 \cdot 54 \cdot 7854$$

$$F = 8 \cdot 0.9 \cdot 1.69 \cdot 54 \cdot 7854$$

$$F = 5160630.35 = \mathbf{5.16 \text{ MN}}$$

Сила ковања за осносиметрични отковак пречника 250 mm .

Полазни подаци: $R_{m(hl)} = 600 \text{ MPa} \rightarrow R_{m(t)} = 54 \text{ MPa}$; $t = 1100^\circ\text{C}$;
 $D = 250 \text{ mm}$

$$A = \frac{D^2\pi}{4} = \frac{250^2\pi}{4} = 49087.4 \text{ mm}^2$$

Прорачун:

$$F = 8 \cdot (1 - 0.001 \cdot D) \left(1.1 + \frac{20}{D}\right)^2 \cdot R_{m(t)} \cdot A$$

$$F = 8 \cdot (1 - 0.001 \cdot 250) \left(1.1 + \frac{20}{250}\right)^2 \cdot 54 \cdot 49087.4$$

$$F = 8 \cdot 0.75 \cdot 1.39 \cdot 54 \cdot 49087.4$$

$$F = 22106996.96 = \mathbf{22.11 \text{ MN}}$$

Сила ковања за осносиметрични отковак пречника 400 mm.

Полазни подаци: $R_{m(hl)} = 600 \text{ MPa} \rightarrow R_{m(t)} = 54 \text{ MPa}$; $t = 1100^\circ\text{C}$;
 $D = 400 \text{ mm}$

$$A = \frac{D^2 \pi}{4} = \frac{400^2 \pi}{4} = 125663.6 \text{ mm}^2$$

Прорачун:

$$F = 8 \cdot (1 - 0.001 \cdot D) \left(1.1 + \frac{20}{D}\right)^2 \cdot R_{m(t)} \cdot A$$

$$F = 8 \cdot (1 - 0.001 \cdot 400) \left(1.1 + \frac{20}{400}\right)^2 \cdot 54 \cdot 125663.6$$

$$F = 8 \cdot 0.6 \cdot 1.32 \cdot 54 \cdot 125663.6$$

$$F = 42995083.07 = \mathbf{43 \text{ MN}}$$

Сила ковања за осносиметрични отковак пречника 900 mm.

Полазни подаци: $R_{m(hl)} = 600 \text{ MPa} \rightarrow R_{m(t)} = 54 \text{ MPa}$; $t = 1100^\circ\text{C}$;
 $D = 900 \text{ mm}$

$$A = \frac{D^2 \pi}{4} = \frac{900^2 \pi}{4} = 636172.51 \text{ mm}^2$$

Прорачун:

$$F = 8 \cdot (1 - 0.001 \cdot D) \left(1.1 + \frac{20}{D}\right)^2 \cdot R_{m(t)} \cdot A$$

$$F = 8 \cdot (1 - 0.001 \cdot 900) \left(1.1 + \frac{20}{900}\right)^2 \cdot 54 \cdot 636172.51$$

$$F = 8 \cdot 0.1 \cdot 1.214 \cdot 54 \cdot 636172.51$$

$$F = 33363940.05 = \mathbf{33.4 \text{ MN}}$$

Напомена: За отковак пречника 1000 mm члан у првој загради у наведеној формули би био 0 ($0.001 \cdot 1000 = 0$) па би се множењем осталих чланова са нулом добио неодређен резултат. Такође, за отковак пречника 990 mm добија се сила ковања од свега 4.3 MN што је очигледно нереално мала вредност.

Сила ковања за неокругли отковак димензија 50×200 mm.

Полазни подаци: $R_{m(hl)} = 600 \text{ MPa} \rightarrow R_{m(t)} = 54 \text{ MPa}$; $t = 1100^\circ\text{C}$;
 $a = 200 \text{ mm}$; $b = 50 \text{ mm}$.

$$A = a \cdot b = 200 \cdot 50 = 10000 \text{ mm}^2$$

$$D = D_n = 1.13 \cdot \sqrt{A} \rightarrow 1.13 \cdot \sqrt{10000} = 113 \text{ mm}^2$$

$$B_{sr} = \frac{A}{L} = \frac{10000}{200} = 50 \text{ mm}$$

Прорачун:

$$F = 8 \cdot (1 - 0.001 \cdot D_n) \left(1.1 + \frac{20}{D_n}\right)^2 \cdot \left(1 + 0.1 \sqrt{\frac{L}{B_{sr}}}\right) \cdot R_{m(t)} \cdot A$$

$$F = 8 \cdot (1 - 0.001 \cdot 113) \left(1.1 + \frac{20}{113}\right)^2 \cdot \left(1 + 0.1 \sqrt{\frac{200}{50}}\right) \cdot 54 \cdot 10000$$

$$F = 8 \cdot 0.887 \cdot 1.63 \cdot 1.2 \cdot 54 \cdot 10000$$

$$F = 7495079.04 \approx \mathbf{7.5 \text{ MN}}$$

Сила ковања за неокругли отковак димензија 100×400 mm.

Полазни подаци: $R_{m(hl)} = 600 \text{ MPa} \rightarrow R_{m(t)} = 54 \text{ MPa}$; $t = 1100^\circ\text{C}$;
 $a = 400 \text{ mm}$; $b = 100 \text{ mm}$.

$$A = a \cdot b = 400 \cdot 100 = 40000 \text{ mm}^2$$

$$D = D_n = 1.13 \cdot \sqrt{A} \rightarrow 1.13 \cdot \sqrt{40000} = 226 \text{ mm}^2$$

$$B_{sr} = \frac{A}{L} = \frac{40000}{400} = 100 \text{ mm}$$

Прорачун:

$$F = 8 \cdot (1 - 0.001 \cdot D_n) \left(1.1 + \frac{20}{D_n}\right)^2 \cdot \left(1 + 0.1 \sqrt{\frac{L}{B_{sr}}}\right) \cdot R_{m(t)} \cdot A$$

$$F = 8 \cdot (1 - 0.001 \cdot 226) \left(1.1 + \frac{20}{226}\right)^2 \cdot \left(1 + 0.1 \sqrt{\frac{400}{100}}\right) \cdot 54 \cdot 40000$$

$$F = 8 \cdot 0.774 \cdot 1.41 \cdot 1.2 \cdot 54 \cdot 40000$$

$$F = 22630026.24 \approx \mathbf{22.6 \text{ MN}}$$

Сила ковања за неокругли отковак димензија 200×600 mm.

Полазни подаци: $R_{m(hl)} = 600 \text{ MPa} \rightarrow R_{m(t)} = 54 \text{ MPa}$; $t = 1100^\circ\text{C}$;
 $a = 600 \text{ mm}$; $b = 200 \text{ mm}$.

$$A = a \cdot b = 600 \cdot 200 = 120000 \text{ mm}^2$$

$$D = D_n = 1.13 \cdot \sqrt{A} \rightarrow 1.13 \cdot \sqrt{120000} = 391.44 \text{ mm}^2$$

$$B_{sr} = \frac{A}{L} = \frac{120000}{600} = 200 \text{ mm}$$

Прорачун:

$$F = 8 \cdot (1 - 0.001 \cdot D_n) \left(1.1 + \frac{20}{D_n}\right)^2 \cdot \left(1 + 0.1 \sqrt{\frac{L}{B_{sr}}}\right) \cdot R_{m(t)} \cdot A$$

$$F = 8 \cdot (1 - 0.001 \cdot 391.44) \left(1.1 + \frac{20}{391.44}\right)^2 \cdot \left(1 + 0.1 \sqrt{\frac{600}{200}}\right) \cdot 54 \cdot 120000$$

$$F = 8 \cdot 0.55 \cdot 1.31 \cdot 1.17 \cdot 54 \cdot 120000$$

$$F = 43700342.4 \approx \mathbf{43.7 \text{ MN}}$$

Сила ковања за неокругли отковак димензија 600×900 mm.

Полазни подаци: $R_{m(hl)} = 600 \text{ MPa} \rightarrow R_{m(t)} = 54 \text{ MPa}$; $t = 1100^\circ\text{C}$;
 $a = 900 \text{ mm}$; $b = 600 \text{ mm}$.

$$A = a \cdot b = 900 \cdot 600 = 540000 \text{ mm}^2$$

$$D = D_n = 1.13 \cdot \sqrt{A} \rightarrow 1.13 \cdot \sqrt{540000} = 830.38 \text{ mm}^2$$

$$B_{sr} = \frac{A}{L} = \frac{540000}{900} = 600 \text{ mm}$$

Прорачун:

$$F = 8 \cdot (1 - 0.001 \cdot D_n) \left(1.1 + \frac{20}{D_n}\right)^2 \cdot \left(1 + 0.1 \sqrt{\frac{L}{B_{sr}}}\right) \cdot R_{m(t)} \cdot A$$

$$F = 8 \cdot (1 - 0.001 \cdot 830.38) \left(1.1 + \frac{20}{830.38}\right)^2 \cdot \left(1 + 0.1 \sqrt{\frac{900}{600}}\right) \cdot 54 \cdot 540000$$

$$F = 8 \cdot 0.17 \cdot 1.26 \cdot 1.12 \cdot 54 \cdot 540000$$

$$F = 55964805.12 \approx \mathbf{56\ MN}$$

4.2 ПРИМЕРИ КОВАЊА НА КОВАЧКИМ ЧЕКИЋИМА

Прорачун је масе падајућих делова чекића је изведен за делове са димензијама датим у табели 4.1.

Маса падајућих делова чекића за отковке са кружном пројекцијом у подеonoј равни:

Маса падајућих делова чекића за осносиметрични отковак пречника 100 mm.

Полазни подаци: $R_{m(hl)} = 600\ MPa \rightarrow R_{m(t)} = 54\ MPa$; $t = 1100^{\circ}C$;

$$D = 100\ mm = 10\ cm$$

Прорачун:

$$m = (1 - 0,005 \cdot D) \left(1,1 + \frac{2}{D}\right)^2 (0,75 + 0,001 \cdot D^2) D \cdot R_{m(t)}$$

$$m = (1 - 0,005 \cdot 10) \left(1,1 + \frac{2}{10}\right)^2 (0,75 + 0,001 \cdot 10^2) 10 \cdot 54$$

$$m = 0.95 \cdot 1.69 \cdot 0.85 \cdot 540$$

$$\mathbf{m = 736.9\ kg}$$

Маса падајућих делова чекића за осносиметрични отковак пречника 250 mm.

Полазни подаци: $R_{m(hl)} = 600\ MPa \rightarrow R_{m(t)} = 54\ MPa$; $t = 1100^{\circ}C$;

$$D = 250\ mm = 25\ cm$$

Прорачун:

$$m = (1 - 0,005 \cdot D) \left(1,1 + \frac{2}{D}\right)^2 (0,75 + 0,001 \cdot D^2) D \cdot R_{m(t)}$$

$$m = (1 - 0,005 \cdot 25) \left(1,1 + \frac{2}{25}\right)^2 (0,75 + 0,001 \cdot 25^2) 25 \cdot 54$$

$$m = 0.875 \cdot 1.3924 \cdot 1.375 \cdot 25 \cdot 54$$

$$\mathbf{m = 2261.6\ kg}$$

Маса падајућих делова чекића за оносиметрични отковак пречника 400 mm.

Полазни подаци: $R_{m(hl)} = 600 \text{ MPa} \rightarrow R_{m(t)} = 54 \text{ MPa}$; $t = 1100^\circ\text{C}$;

$D = 400 \text{ mm} = 40 \text{ cm}$

Прорачун:

$$m = (1 - 0,005 \cdot D) \left(1,1 + \frac{2}{D}\right)^2 (0,75 + 0,001 \cdot D^2) D \cdot R_{m(t)}$$

$$m = (1 - 0,005 \cdot 40) \left(1,1 + \frac{2}{40}\right)^2 (0,75 + 0,001 \cdot 40^2) 40 \cdot 54$$

$$m = 0,8 \cdot 1,32 \cdot 2,35 \cdot 40 \cdot 54$$

$$\mathbf{m = 5360.3 \text{ kg}}$$

Напомена: За отковак пречника 650 mm маса падајућих делова чекића према наведеној формули износи 15061.5 kg.

Маса падајућих делова чекића за оносиметрични отковак пречника 900 mm.

Полазни подаци: $R_{m(hl)} = 600 \text{ MPa} \rightarrow R_{m(t)} = 54 \text{ MPa}$; $t = 1100^\circ\text{C}$;

$D = 900 \text{ mm} = 90 \text{ cm}$

Прорачун:

$$m = (1 - 0,005 \cdot D) \left(1,1 + \frac{2}{D}\right)^2 (0,75 + 0,001 \cdot D^2) D \cdot R_{m(t)}$$

$$m = (1 - 0,005 \cdot 90) \left(1,1 + \frac{2}{90}\right)^2 (0,75 + 0,001 \cdot 90^2) 90 \cdot 54$$

$$m = 0,55 \cdot 1,26 \cdot 8,85 \cdot 90 \cdot 54$$

$$\mathbf{m = 29806.6 \text{ kg}}$$

Маса падајућих делова чекића за неокругли отковак димензија 50×200 mm.

Полазни подаци: $R_{m(hl)} = 600 \text{ MPa} \rightarrow R_{m(t)} = 54 \text{ MPa}$; $t = 1100^\circ\text{C}$;

$a = 200 \text{ mm}$; $b = 50 \text{ mm}$.

$$A = a \cdot b = 200 \cdot 50 = 10000 \text{ mm}^2$$

$$D = D_n = 1,13 \cdot \sqrt{A} \rightarrow 1,13 \cdot \sqrt{10000} = 113 \text{ mm}^2$$

$$B_{sr} = \frac{A}{L} = \frac{10000}{200} = 50 \text{ mm} = 5 \text{ cm}$$

Прорачун:

$$m_n = m \left(1 + 0,1 \cdot \sqrt{\frac{L}{B_{sr}}} \right)$$

$$m_n = 736.9 \cdot \left(1 + 0,1 \cdot \sqrt{\frac{200}{5}} \right) = 736.9 \cdot (1 + 0.2)$$

$$m_n = 884.3 \text{ kg}$$

Маса падајућих делова чекића за неокругли отковак димензија 100×400 mm.

Полазни подаци: $R_{m(hl)} = 600 \text{ MPa} \rightarrow R_{m(t)} = 54 \text{ MPa}$; $t = 1100^\circ\text{C}$;

$a = 400 \text{ mm}$; $b = 100 \text{ mm}$.

$$A = a \cdot b = 400 \cdot 100 = 40000 \text{ mm}^2$$

$$D = D_n = 1.13 \cdot \sqrt{A} \rightarrow 1.13 \cdot \sqrt{40000} = 226 \text{ mm}^2$$

$$B_{sr} = \frac{A}{L} = \frac{40000}{400} = 100 \text{ mm} = 10 \text{ cm}$$

Прорачун:

$$m_n = m \left(1 + 0,1 \cdot \sqrt{\frac{L}{B_{sr}}} \right)$$

$$m_n = 2261.6 \cdot \left(1 + 0,1 \cdot \sqrt{\frac{40}{10}} \right) = 2261.6 \cdot (1 + 0.2)$$

$$m_n = 2713.9 \text{ kg}$$

Маса падајућих делова чекића за неокругли отковак димензија 200×600 mm.

Полазни подаци: $R_{m(hl)} = 600 \text{ MPa} \rightarrow R_{m(t)} = 54 \text{ MPa}$; $t = 1100^\circ\text{C}$;

$a = 600 \text{ mm}$; $b = 200 \text{ mm}$.

$$A = a \cdot b = 600 \cdot 200 = 120000 \text{ mm}^2$$

$$D = D_n = 1.13 \cdot \sqrt{A} \rightarrow 1.13 \cdot \sqrt{120000} = 391.44 \text{ mm}^2$$

$$B_{sr} = \frac{A}{L} = \frac{120000}{600} = 200 \text{ mm} = 20 \text{ cm}$$

Прорачун:

$$m_n = m \left(1 + 0,1 \cdot \sqrt{\frac{L}{B_{sr}}} \right)$$

$$m_n = 5360.3 \cdot \left(1 + 0,1 \cdot \sqrt{\frac{60}{20}} \right) = 5360.3 \cdot (1 + 0.173)$$

$$m_n = 6288.7 \text{ kg}$$

Маса падајућих делова чекића за неокругли отковак димензија 600×900 mm.

Полазни подаци: $R_{m(hl)} = 600 \text{ MPa} \rightarrow R_{m(t)} = 54 \text{ MPa}$; $t = 1100^\circ\text{C}$;

$a = 900 \text{ mm}$; $b = 600 \text{ mm}$.

$$A = a \cdot b = 900 \cdot 600 = 540000 \text{ mm}^2$$

$$D = D_n = 1.13 \cdot \sqrt{A} \rightarrow 1.13 \cdot \sqrt{540000} = 830.38 \text{ mm}^2$$

$$B_{sr} = \frac{A}{L} = \frac{540000}{900} = 600 \text{ mm} = 60 \text{ cm}$$

Прорачун:

$$m_n = m \left(1 + 0,1 \cdot \sqrt{\frac{L}{B_{sr}}} \right)$$

$$m_n = 29806.6 \cdot \left(1 + 0,1 \cdot \sqrt{\frac{90}{60}} \right) = 29806.6 \cdot (1 + 0.15)$$

$$m_n = 34277.6 \text{ kg}$$

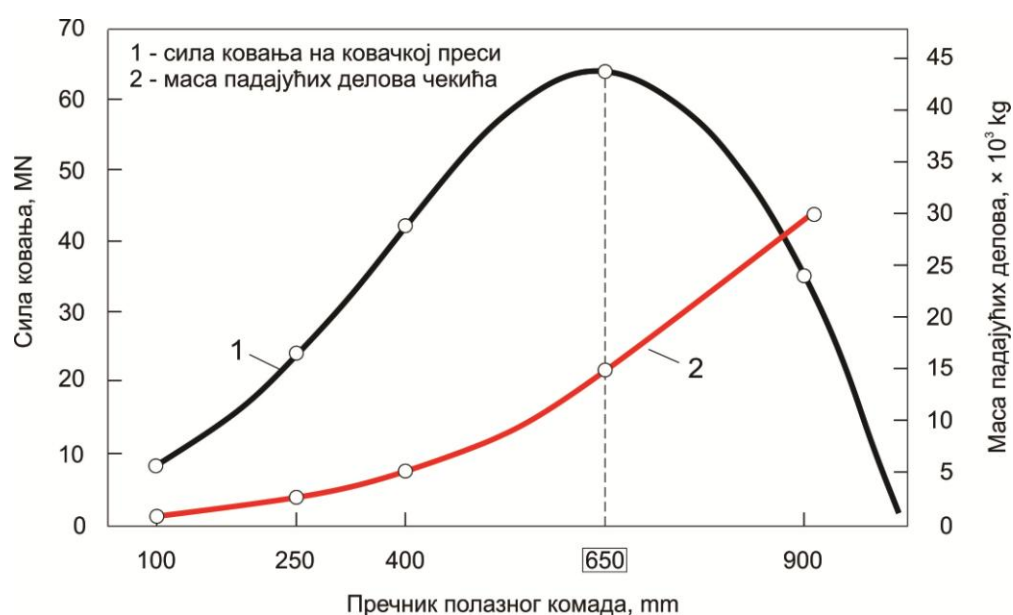
Резултати за силу ковања округлих и неокруглих отковака добијени прорачуном су приказани табеларно у табели 4.2 и на дијаграмима на сликама 3.18 и 3.19.

Табела 4.2 Сила ковања на преси и маса падајућих делова чекића за округле отковке

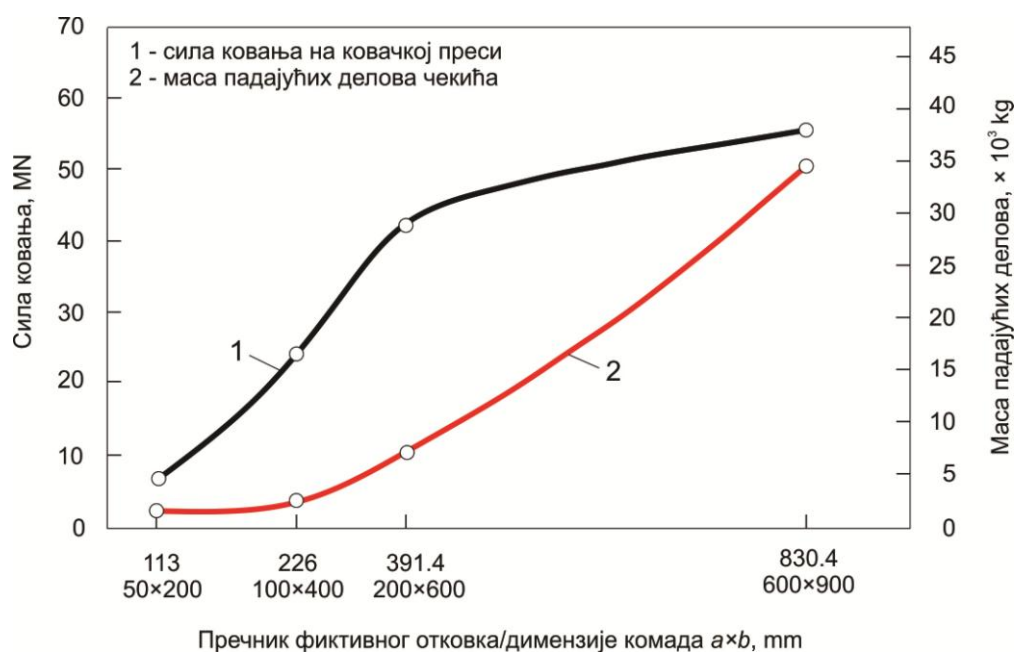
Пречник отковка, mm	100	250	400	900
Сила ковања, MN	5.16	22.11	43.00	34.63
Маса падајућих делова, kg	736.9	2257.7	5360.3	29806.6

Табела 4.3 Сила ковања на преси и маса падајућих делова чекића за неокругле отковке

Габарити у подеonoј равни, mm	50×200	100×400	200×600	600×900
Пречник фиктивног отковка, mm	113	226	391.4	830.4
Сила ковања, MN	5.66	22.63	43.70	55.96
Маса падајућих делова, kg	884.3	2713.9	6288.7	34277.6



Слика 3.18 Сила ковања на преси и маса падајућих делова чекића за округле отковке



Слика 3.19 Сила ковања на преси и маса падајућих делова чекића за неокругле отковке

5. ЗАКЉУЧАК

Ковање је једна од најзначајнијих технологија пластичног обликовања метала. Ковањем се запремински делови/полуфабрикати обликују у финални производ који може имати веома сложену геометрију. То обликовање се може извести на различитим машинама и радним температурама. У зависности од радне температуре предмета обраде ковање се дели на ковање на топло и ковање на хладно. Поред тога, ковање се разликује у зависности од коришћене машине и може се извести на ковачким пресамa и ковачким чекићима. Притом, за успешно извођење процеса ковања неопходно је дефинисати све кључне параметре процеса као што су: димензије полазног комада, врста и тип машине, температура ковања, сила ковања или маса падајућих делова, број фаза ковања и др.

Један од најбитнијих параметара процеса јесте врста машине и неопходно оптерећење за обликовање дела које мора бити одређено са одређеном тачношћу да би процес био изведен успешно. При одређивању силе ковања на ковачкој преси или масе падајућих делова чекића код ковачког чекића веома често се користе емпириске формуле за израчунавања наведених вредности. С обзиром на то да су постојале сумње у тачност тих формула при ковању делова већег пречника циљ овог рада је био утврђивање граничних димензија до којих се може рећи да постојећи емпиријски изрази важе тј. дају задовољавајуће резултате. Закључак добијен на основу прорачуна за различите пречнике за округле и неокругле отковке је да:

- формула за израчунавање силе ковања на ковачкој преси за округле отковке даје задовољавајуће резултате за отковке пречника до 650 mm. За округле отковке већег пречника формула не даје поуздане резултате јер се добијају веома ниске вредности силе.
- формула за израчунавање силе ковања на ковачкој преси за неокругле (призматичне) отковке даје задовољавајуће резултате за отковке са релативно великим фиктивним пречником, при чему значајан утицај има однос L/B_{sr} .
- формула за израчунавање масе падајућих делова чекића за округле отковке даје релативно задовољавајуће резултате. За округле отковке веома великог пречника формула даје значајно веће вредности па их треба узети у обзир са одређеном резервом.
- формула за израчунавање масе падајућих делова чекића за неокругле (призматичне) отковке такође даје задовољавајуће резултате за отковке са великим фиктивним пречником. Тренд криве за неокругле отковке је готово исти као за округле отковке.

Дакле, наведени емпиријски изрази за прорачун параметара ковања на ковачкој преси и ковачком чекићу се могу користити за прорачун код ковања отковака пречника не већег од ~ 650 mm. За веће отковке треба приступити другим методима израчунавања силе ковања и масе падајућих делова.

**ПРИЛОГ – најчешће коришћени материјали за израду предмета
обrade и ковачких алата**

За ковачке алате	За предмете обраде (отковке)
Č 4150	Č 1120
Č 4650	Č 1220
Č 4750	Č 1530, Č 1531, Č 1580
Č 4751 (UTOP Mo1)	Č 1730, Č 1731
Č 5742 (UTOP Extra)	Č 2133, Č 2332
Č 6450 (UTOP 1)	Č 3130, Č 3135
Č 6453 (UTOP Special)	Č 4120, Č 4184, Č 4320, Č 4730, Č 4731, Č 4732, Č 4830
	Č 5430, Č 5431, Č 5432, Č 5480
	Č 7100, Č 7400, Č 7401, Č 7431

6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Девеџић Б.: *Обрада метала деформисањем, IV део - Увод у технологију ковања*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 1985.
- [2] Александровић С., Стефановић М.: *Технологија пластичног обликовања метала*, уџбеник, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2010.
- [3] Александровић С.: *Савремени поступци пластичног обликовања*, скрипта, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2014.
- [4] Јовановић М., Лазић В., Адамовић Д., Ратковић Н.: *Машински материјали*, универзитетски уџбеник, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2003.
- [5] К. Lange: *Handbook of Metal Forming*, SME, Dearborn, MI, USA, 1985.
- [6] *Metal Forming Handbook*, Schuler, Springer - Verlag, Berlin - Heidelberg, 1998.