

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Машински материјали

Број индекса: 83/2016

Павле Д. Павловић

Магнезијум и његове легуре

Завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Драган Адамовић, ред. проф.

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да да преглед развоја и употребе магнезијума и његових легура. На почетку дати историјски развој магнезијумских материјала. У даљем делу рада описати њихову класификацију и својства, као и методе добијања. Затим описати различите његове легуре и њихову обрадивост. На крају дати примере примене магнезијума и његових легура.

Наслов рада:

МАГНЕЗИЈУМ И ЊЕГОВЕ ЛЕГУРЕ

Оквирни садржај рада:

1. Увод
2. Металургија магнезијума
3. Легуре магнезијума
4. Обрадивост магнезијума и његових легура
5. Особине магнезијума и његових легура
6. Примена магнезијума и његових легура
7. Закључак
8. Литература

Препоручена литература:

1. М. Јовановић, Д. Адамовић и др., Машински материјали, Машински факултет, Крагујевац, 2003.
2. Zdenka Lenhard, Metalurgija obojenih metala II, Metalurški fakultet, Sisak, 2008.
3. Mustafa Kemal Kulekci, Magnesium and its alloys applications in automotive industry, Int J Adv Manuf Technol (2008) 39:851–865
4. H.E. Fridrih, B.L. Mordike, ed., Magnesium technology, Metallurgy, Design data. Applications, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2006.
5. J. Polmear, Light Alloys From Traditional Alloys to Nanocrystals, Elsevier, AMSTERDAM 2006.

Крагујевац, мај 2020.

Резиме

Укратко су описани поступци за производњу магнезијума и његова биолошка својства. Такође је дискутовано о његовом легирању са посебним освртом на улогу појединих елемената за легирање као и кратак осврт на само откриће и историјски развој магнезијума. Засебно се разматра обрадивост магнезијума и његових легура. Реч је о заваривању, обради деформисањем, термичкој обради, механичкој обради и обради ливењем. Посебна пажња се посвећује односима механичких својстава и понашању магнезијума и његових легура у додиру са корозијом. На крају, разматрају се садашњи и будући трендови у употреби легура магнезијума заједно са примерима недавних примена.

Кључне речи: магнезијум, легуре магнезијума, обрадивост магнезијума, употреба магнезијума, својства магнезијума.

Abstract

Methods for the production of magnesium and its biological properties are briefly described. It was also discussed about its alloying behaviour with particular reference to the roles of individual alloying elements, as well as a brief overview of the discovery and historical development of magnesium. The workability of magnesium and its alloys is considered separately. These are welding, deformation processing, heat treatment, mechanical processing and casting. Special attention is paid to the relations of mechanical properties and the behavior of magnesium and its alloys in contact with corrosion. Finally, current and future trends in the use of magnesium alloys are considered together with examples of recent applications.

Keywords: magnesium, magnesium alloys, workability of magnesium, use of magnesium, properties of magnesium.

Садржај

1. Увод.....	5
1.1 Магнезијум као биолошки елемент	5
1.1 Историјски развој	7
2. Металургија магнезијума.....	9
3. Легуре магнезијума	13
3.1 Означавање магнезијума и његових легура.....	18
4. Обрадивост магнезијума и његових легура	21
4.1 Заваривање	21
4.2 Обрада деформисањем.....	25
4.3 Механичка обрада	26
4.4 Термичка обрада.....	27
4.5 Обрада ливењем	29
5. Особине магнезијума и његових легура.....	37
5.1 Физичка својства	37
5.2 Механичка својства	38
5.3 Отпорност на корозију	39
6. Примена магнезијума и његових легура	41
6.1 Употреба у аутомобилској индустрији	41
6.2 Биомедицинска употреба.....	44
6.3 Употреба у авио и ракетној индустрији	45
6.4 Употреба магнезијума у другим областима.....	47
7. Закључак	50
8. Литература.....	51

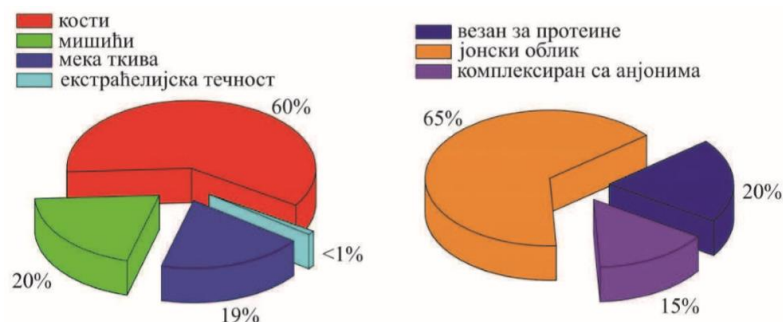
1. Увод

Магнезијум (**Mg**, латински *magnesium*) је земноалкални метал IIa групе, 3 периоде периодног система елемената. Гради Mg^{2+} јоне и јонска једињења. Оксидациони број магнезијума у једињењима је +2, уз врло ретке изузетке где има оксидациони број +1. Има најнижу температуру топљења у групи земноалкалних метала. Стабилни изотопи магнезијума су ^{24}Mg , ^{25}Mg и ^{26}Mg . Он је осми најраспрострањенији елемент у Земљиној кори и девети генерално у познатом свемиру. Магнезијум је четврти по распрострањености елемент Земље у глобалу (иза челика, кисеоника, силицијума), чини око 13% укупне планете Земље. Име метала магнезијум потиче од старогрчког назива за дистрикт у Тесалији звани Магнезија. Назив му је у вези са магнетитом и манганом који такође потичу из овог подручја, а данас означавају сасвим друге супстанце. Због велике растворљивости магнезијумових јона у води, он је и трећи по заступљености растворени елемент у светским морима. Магнезијум се ствара у звездама већим од три сунчеве масе путем фузије хелијума и неона у алфа процесу при температурама изнад 600 МК. [3] У елементарном стању (као метал) се не може наћи у природи на Земљи јер је веома реактиван. Када се издвоји у елементарном стању стајањем на ваздуху врло брзо оксидује те се његова површина прекрије танким слојем оксида (пасивизира се). У облику металног праха гори уз карактеристичан блештећи бели пламен, што га чини честим састојком за пиротехничке справе и ракете. Овај метал се данас најчешће добија електролизом магнезијумских соли изолованих из слане воде. Комерцијално, магнезијум се најчешће користи за легирање других метала, производњу легуре алуминијума и магнезијума познатије као **магналијум** или **магнелијум**. Пошто је магнезијум око трећине лакши од алуминијума (има мању густину) ове легуре се цене због своје релативне лакоће и чврстоће. У природи се магнезијум веома често налази у виду силиката, али са становништва добијања најважнији минерали су му: доломит, магнезит, калцит, карбонат.

1.1 Магнезијум као биолошки елемент

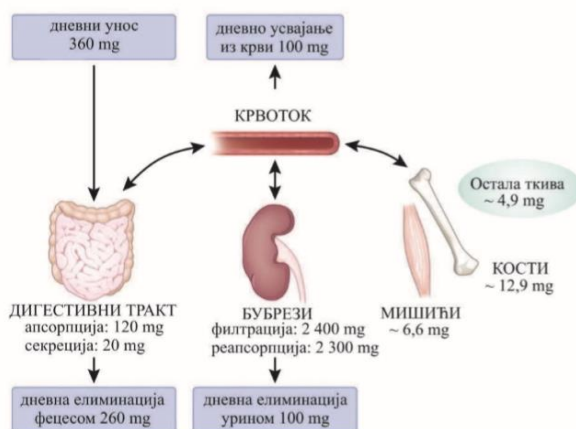
Магнезијум је по распрострањености шести елемент у литосфери ($O > Si > Al > Ca > Mg$), други у хидросфери (морска вода: $Na > Mg > Cl > K$) и четврти катјон у људском организму ($Ca > K > Na > Mg$). У литосфери је заступљен са око 2,7 % и то у форми минерала карбоната $CaMg(CO_3)$ (доломит), сулфата $MgCO_3$ и H_2O (епсомит), затим хлорида $KMgCl_3$ и $6H_2O$ (карналит), силиката $(MgFe)_2SiO_4$ (оливин), као и минерала вулканског порекла. Просечни садржај магнезијума у морској води је око 1300 mg/L, док је највећи садржај овог метала карактеристичан за Мртво море (4700 mg/L). Стална тврдоћа воде потиче од соли магнезијума и калцијума (сулфати и хлориди). Организам одраслог човека садржи од 22 до 26 g магнезијума. У биљном свету магнезијум је стална компонента хлорофила.

Од укупног магнезијума у организму човека око 60% улази у састав костију, од којих је 30% изменљив и доступан за одржавање сталне концентрације овог јона у плазми. Око 20% је у мишићима, 19% у меким ткивима, а мање од 1% у екстраћелијској течности (слика 1.1a). Код одраслог човека укупни серумски магнезијум је у интервалу од 0,7 до 1,1 mmol/L, од чега је 20% везано за протеине, 65% у јонском облику, а остатак комплексиран са различитим анијонима (фосфати, цитрати). Од протеински везаног магнезијума 60-70% је везан за албумине а остатак за глобулине (слика 1.1b) [1]



Слика 1.1 *Распоред магнезијума у (а) организму човека (б) плазми*

Магнезијум се апсорбује у дигестивном тракту (у танком цреву), складишти у минералном матриксу коштаног ткива и излучује преко уринарног и дигестивног тракта (слика 1.2).



Слика 1.2 *Хомеостаза магнезијума у организму*

Од укупног магнезијума који се унесе у организм 30 – 40% се апсорбује, а остатак се елиминира. Бубрези су битни органи у хомеостазу магнезијума, серумска концентрација овог метала је одређена његовом екскрецијом у урину. У физиолошким условима приближно 2400mg магнезијума из плазме пролази гломерулалну филтрацију, од тога се приближно 95% одмах реабсорбује, а 3 – 5% излучује урином. Препоручени дневни унос магнезијума за различита животна доба по препоруци Националног института за здравље (US Department of Health and Human Services) је:

- За децу око 80 mg,
- Адолесценте до 240 mg,
- Одрасле особе мушког пола око 400 mg,
- Док је за особе женског пола препоручљиво да конзумирају 20% дневног уноса за мушкарце.

Дневне потребе за овим металом задовољавају се разноврсном исхраном, јер је магнезијум широко распрострањен у биљкама и животињама. Зелено лиснато поврће, као што су спанаћ, броколи, махунарке, затим ораси, семенке и интегралне житарице, авокадо, парадајз, банана су добри извори магнезијума. Дobar извор магнезијума су и минералне воде. Садржај магнезијума који се налази у минералним водама на нивоу Републике Србије креће се у интервалу (од 1 до 1000 mg/L). Магнезијум интерагује са калцијумом у многим процесима у организму, као што су перулацја рада крвних судова, контракција мишића – укључујући и срчани мишић. Калцијум стимулише мишиће и контракције крвних судова, док магнезијум опушта мишиће и шири крвне судове. Симптоми недостатка магнезијума су: раздражљивост, промена личности, анорексија, замор, несаница, алергија, узнемиреност, грчење мишића, ломљење костију,

крварење и ломљење зуба, проблем са срцем [2]. Магнезијум је један од есенцијалних метала за биљни свет. Без овог метала хлорофил (зелени пигмент смештен на тилакоидима хлоропласта) не може апсорбовати Сунчеву светлост, без које нема процеса фотосинтезе, односно нема зелене боје листова. Основни корак у фотосинтези је трансфер електрона са H_2O на CO_2 уз ослобађање O_2 из CO_2 што омогућава молекулу воде да интерагује са угљеником и да настане глукоза, извор енергије за живи свет. Основна храна биљака су минерали које њихово корење узима из земље, а затим претвара у органске материје под дејством Сунчеве светлости. Магнезијум улази у састав хлорофила (где је везан са азотом у порфириноском језгру) који одређује зелену боју и значајан је за фотосинтезу и бројне физиолошке процесе у биљци. Концентрација магнезијума у биљкама је (0,1-1%).

1.1 Историјски развој

Прича о открићу магнезијума започела је систематским истраживањем шкотског хемичара Џозефа Блека 1755. године, који је јасно разликовао калцит и магнезит и описао магнезит као спој до сада непознатог метала. Због свог изразито негативног нормалног потенцијала, међутим, сви покушаји изолације основног метала од магнезита у почетку су били узалудни. Тек након открића електричне енергије и њене употребе као и аналитичке методе, постало је могуће да се представе чак и тешки базни метали. Године 1809. Сир Хумпхри Дави (слика 1.4) је електролизовао навлажени магнезијум оксид помоћу волтиног стуба са катодом од живе. Испаривањем живе добио је - врло нечист - метал, који је назвао Магниум. 1814. године Берзелиус је предложио симбол елемента Mg и назив магнезијум. Због обилних резерви и јединствених својстава метала, индустрија магнезијума ће се ширити у наредним деценијама. Подстакнута потребама електронике и аутомобилске индустрије, светска производња наставља да расте последњих година. [4] Магнезија је раније била позната као „бели камен“ или „бела земља. Опште је прихваћено да име потиче из области у Тесалији у северној Грчкој, где је у давним временима материјал ископан и извожен у земље око Медитерана. Заправо, британски хемичар и научник Сир Хумпхреи Дави је почаствован као проналазач, јер је управо он изоловао метал. Тачно 20 година касније изоловао је Француз Антоине Алекандре Брутон Бусси метал спајањем дехидрираног магнезијум хлорида са калијумом на повишеној температури. Затим Мајкл Фарадеј, познати британски научник и бивши асистент Сир Хумпхреи је електролизом смањио дехидрирани магнезијум хлорид и 1833. године добио чисти метални магнезијум. Немац Роберт-Вилхелм Бунсен, након што је развио угљеник-цинк 1841. године, пронашао је метални магнезијум 1852. године, такође почев од стопљеног и дехидрираног магнезијум хлорида. Поред мањих покушаја у неким европским земљама магнезијум је постојао стални интерес само за Немачку, која је 1868. године била једини произвођач на свету, користећи метал углавном као прах или траку за батеријске лампе, и друге пиротехничке сврхе, и као редукционо средство у производњи алуминијума. У Јапану је *Riken Metal Manufacturing* започео производњу магнезијума 1931. Укупно годишња производња је процењена на приближно 3.000 тона. После Другог светског рата, производња магнезијума драстично се смањила. Немачкој је било забрањено да производи магнезијум. Већина немачког магнезијума производила се у зони Немачке и Аустрије. Постројења магнезијума у *Aken-u*, Немачка и *Moosbienenbaum*, Аустрија су демонтирани и пренешени у СССР. Слично томе, сва производња магнезијума престала је у Јапану до 1946, делом и због несташице материјала. У Југославији у Магнохрому производило се 5.000 тона годишње магнезијума коришћењем процеса Магнетхерм у косовском региону Србије 1979. Производња у погону Бела Стена била је 5.000 тона годишње 1985. године. Погон је проширен и достигао је врхунац производње 1992. године од 8.000 тона годишње. Због

претрпљених санкција уведених 1992. године против Србије и Црне Горе, производња је опала и погон је затворен 1999. године због прекида испоруке нафте од НАТО активности. Погон, који се сада налази у Србији, наставио је производњу на ниском нивоу.



Слика 1.3 *Хамфри Дејви проналазач магнетијума*

2. Металургија магнезијума

Магнезијум је, поред осталог, и важан стратешки метал, па је његова производња знатно расла у годинама непосредно пре и за време првог и другог светског рата. Тридесетих година овог века производња магнезијума нагло је опала и није прелазила 2000 тона годишње. Међутим, већ 1938. године произведено је (без СССР) 22000 тона магнезијума. У току рата поред електролитичког поступка уведен је и поступак металотермије, па производња метала нагло расте. Године 1943. светска производња магнезијума износила је 230000 тона. По завршетку рата производња поново опада на 8600 тона (1946. године), али у 1957. години износи 97500 тона, 1970. године 215000 тона и 1975. године 276000 тона. За разлику од других обојених метала, светска производња металног магнезијума у последњих 10-15 година стално расте. Поред све шире и разноврсније примене магнезијума у низу индустријских грана, пораст производње и потрошње магнезијума у свету последица је све веће примене магнезијумових легура у авионској индустрији и ракетној техници. Томе су допринела и интензивна истраживања и постигнути успеси у производњи нових магнезијумових легура са елементима групе ретких земаља, које имају висока механичка својства и на повишеним температурама (до 300 °C). Од укупне светске производње магнезијума око 40% троши се у облику метала, претежно у металургији и у хемијској индустрији, а око 60% магнезијума троши се као конструкциони материјал у облику многобројних магнезијумових легура. Кина је међу глобалним земљама које су најбогатије магнезијумом, чије главне сировине магнезијума долазе из извора магнезита, доломита, језерске и морске воде. У поређењу са осталим структурним материјалима, магнезијум и легуре магнезијума могу се похвалити низом предности: ниска густина, висока специфична чврстоћа и тако даље. Од 1990-их, нагли пораст производње примарног магнезијума виђен је у Кини и постао је пети главни обојени метал након алуминијума, бакра, олова и цинка. Примарна производња магнезијума достигла је 816.000 тона током 2005. године што је 2,4 пута више од производње у 2000. години. У табели 1 је приказана примарна производња магнезијума у Кини и у свету.

Табела 1. *Примарна производња магнезијума у Кини и свету*

Година	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Кина (10 ³ тона)	195	216	268	354	450	468
Свет (10 ³ тона)	479	448	468	544	655	667
Допринос Кине (%)	40,7	48,2	57,3	65,1	68,7	70,2

Кина је највећи примарни магнезијум произвођач у свету, а Пидгеон поступак изумљен је 1940. године у Канади и важна је техника за производњу примарног магнезијума. Производња магнезијума процесом Пидгеон може се похвалити предностима: кратак технички процес, мала улагања, брз завршетак процеса и ниски производни трошкови, али процес доводи до релативно озбиљног загађења животне средине и емисије штетних гасова у ваздуху који су настали услед потрошње енергије. Главни процес примарне производње магнезијума са обзиром на начин вађења, калцинирање доломита, састоји се од пелетирања, редукције, пречишћавања и ливења које се састоји од четири корака. Доломит се обично третира термичком методом: он се

састоји од редукције магнезијумовог оксида, произведеног калцинирањем доломитне сировине, феросилицијумом да би се добио метални магнезијум и калцијум-гвожђе.

Корак 1: Доломитна руда се дроби и загрева у пећи да би се добила смеша магнезијумових и калцијумових оксида, поступак познат као калцинирање.

Корак 2: Следећи корак је редукција магнезијум оксида. Редукујући агенс је феросилицијум (легура гвожђа и силицијума) који се прави загревањем песка коксом и отпадним гвожђем и обично садржи око 80% силицијума.

Корак 3: Оксиди се помешају са уситњеним феросилицијумом и од њих се праве брикети за утовар у реактор. Реакција се изводи на 1500 - 1800 К под врло ниским притиском, близу вакуума. У овим условима магнезијум се производи у облику паре која се кондензује хлађењем на око 1100К.

Корак 4. уклањањем паре магнезијума како настаје, реакција се завршава. Силицијум диоксид комбинује се са калцијум-оксидом дајући топљену шљаку, калцијум-силикат. Процес даје магнезијум чистоће до 99,99%, нешто већи него у електролитским процесима.

Потрошња материјала обично укључује доломит, феросилицијум и флуорит. Доломитна руда, која се минира и транспортује у погон за магнезијум убацује се у ротационе или вертикалне пећи на око 1200°C. Процес калцинирања дат је следећом реакцијом: $(\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3) \sim (\text{CaO} \cdot \text{MgO}) + 2\text{CO}_2$. Металуршки магнезијум није намењен даљој преради у полупроизводе већ се углавном користи за израду легура магнезијума, односно примењује се у легурама алуминијума као легирајући елемент. Према чистоћи разликујемо два типа металуршког магнезијума, Н-Mg99,95 и Н-Mg99,8 а садржај примеса у њима дат је у табели 2.

Табела 2. Металуршки магнезијум

Ознака	WN ⁰	Mg%	Дозвољене примесе у %						
			svega	Cu	Mn	Ni	Fe	Si	ostali
Н-Mg99,95	3.5002	99,95	0,05	0,002	0,01	0,001	0,003	0,01	0,01
Н-Mg99,98	3.5003	99,80	0,20	0,02	0,10	0,002	0,05	0,10	0,05

Због своје радиоактивности магнезијум се увек налази у спојевима, од којих су најважнији карбонати, силикати, хлориди и сулфати (табела 3).

Табела 3. Једињења у којима се налази магнезијум

			Mg (%)
Карбонати	Магнезит	MgCO ₃	28
	Доломит	MgCO ₃ CaCO ₃	13
Хлориди и сулфати	Бишофт	MgCl ₂ 6H ₂ O	12,0
	Карналит	MgCl ₂ KCl6H ₂ O	8,8
	Каинит	KclMgSO ₄ 3H ₂ O	9,7
	Кисерит	2MgSO ₄ K ₂ SO ₄ H ₂	26,3
Силикати	Оливин	MgSiO ₄	35
	Талк	MgH ₂ (SiO ₃) ₄	19
	Серпентин	MgH ₄ SiO ₂ O ₄	36

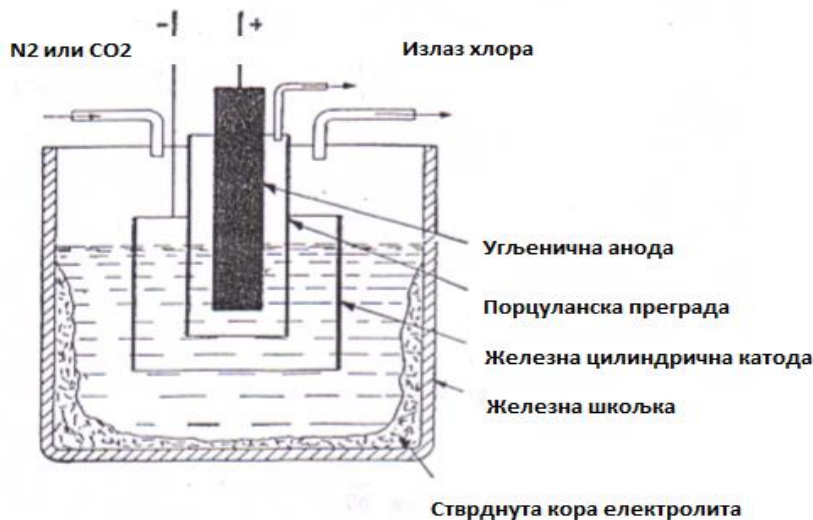
Доломит: Доломита има око 40% у карбонатним стенама. Може служити као везивни материјал у грађевинарству. Његовим пржењем се добија оксид, чијом редукцијом се добија магнезијум. Може се такође превести у хлорид за електролитичко добијање магнезијума. Активност добијеног MgO зависи о температури пржења и саставу доломита.

Карналит: Лакше се ослобађа воде него бишофит, што је нужно за електролизу. Прочишћавањем од присутних NaCl и гипса, из природног карналита добија се уметни карналит, погодан за електролитичко добијање магнезијума.

Бишофит: Доста чисти бишофит добија се прерадом природног карналита, али његов највећи извор су морска вода, слана језера и остали природни извори.

Силикати: Пошто их има пуно, велики су извор магнезијума. За сада служе само за производњу азбеста, али се истражује могућност примене за производњу магнезијума.

Магнезијум (Mg) постоји у морској води као јони магнезијума. Најважније, магнезијум хлорид се налази у морској води. Натријум, хлорид, магнезијум, сулфат и калцијум су најзаступљенији растворени јони у морској води. Магнезијум је трећи елемент по заступљености растворен у морској води после натријума и хлора. Хемијски састав морске воде, како је дат у табели 4 указује на садржај магнезијума у морској води. Глобално, ресурси за Mg могли би се описати као готово неограничени. Минерала евапорита који садрже доломит и магнезијум има у изобиљу. Производња магнезијума из морске воде или других врста слане воде тренутно је ефикасна и нешкодљива по животну средину. Неки покушаји производње магнезијума из морске воде укључују употребу отворених система. Неки од таквих система и метода описани су на следећи начин. Систем за производњу елементарног магнезијума (Mg) из морске воде који има ћелију са паром пропустљивих мембрана који дефинишу анодни одељак са анодом. Између пара мембрана обезбеђен је простор кроз који морска вода може слободно да тече. Извор електричне струје повезан је са анодом и катодом за пуњење одељака како би проузроковао да јони унутар морске воде пређу у одељке при чему се одвајају позитивни и негативни јони. Електрични набој повезан са катодом узрокује распадање морске воде на H_2 и $(OH)_2$, а позитивно наелектрисани јони магнезијума унутар морске воде пролазе кроз катодно пропусну мембрану да би се спојили са $(OH)_2$ да би створили талог магнезијум хидроксида.



Слика 2.1 Електролитичка ћелија за производњу магнезијума

Ћелије за добијање магнезијума компликованије су од оних за добијање алуминијума (слика 2.1). Због издвајања хлора на аноди, долазило би до загађивања околине као и до међусобне реакције произведеног магнезијума и хлора (обоје одлазе на површину), па се анодни простор мора изолирати. Изолирање (одвајање) се спроводи дијафрагом (преградом), која може бити направљена од ватросталног материјала. Ћелије су изнутра обложене ватросталним материјалом. Анода је графитна, а са обе стране аноде налазе се челичне плоче, које имају улогу катода. У електролит се између аноде и катоде ставља дијафрагма, која одваја метал који плива на површини, од анодног хлора, који се одводи у цевовод. Катоде имају на дну и врху перфорације, да се

омогући циркулација електролита и транспорт капљица магнезијума у катодни простор. Електролит се меша услед конвекције као и услед кретања мехурића хлора, који се издвајају на аноди. [7]

Табела 4. Главни јони морске воде (mg/L)

	Типична морска вода	Источни медитеран	Арапски залив у Кувајту	Црвено море
Хлорид	18980	21200	23000	22219
Содиум	10556	11800	15850	14225
Сулфат	2649	2950	3200	3078
Магнезијум	1262	1403	1765	742
Калцијум	400	423	500	225

Да бисмо магнезијум добили из његових ресурса, морамо да применимо енергију да би добили корисну количину Mg. У овом контексту примећено је да се реч екстракција неправилно користи у литератури. Вађење је кључни процес који магнезијум чини доступним из ових извора. Реч екстракт једноставно значи уклонити или извадити, посебно напорима или силом. За екстракцију магнезијума из његових руда мора се користити одговарајући поступак дизајниран коришћењем одговарајуће врсте енергије. Када је реч о морској води, хемијски приступ за добијање магнезијума као магнезијум хлорида је тренутна опција. Овде се енергија формирања хемикалија које учествују користи у процесу одвајања. Магнезијум се екстрактује из морске воде прво таложењем као магнезијум хидроксид, па се додаје хлороводонична киселина. Киселина реагује са хидроксидом, формирајући магнезијум хлорид као крајњи производ. Овај процес је у индустријским размерама добро познат као Dow процес. Друга опција је употреба предложеног преференцијалног раздвајања соли, или физичка метода за одвајање магнезијума директно као магнезијум хлорид. Овај приступ користи топлотну енергију у испаравању морске воде. Овај поступак екстракције представља само једну фазу у добијању магнезијума. Друга важна фаза је електролиза магнезијум хлорида сушењем овог производа на 1,5 mol-а воде; а затим га уводи директно у ћелије за електролизу. Овде се енергија електролизе користи за добијање магнезијума као крајњег производа: $\text{MgCl}_2^{2+} \rightarrow \text{Енергија Mg} + \text{C}$.

У основи, два претходно описана корака представљају обједињене поступке екстракције добијања магнезијума, као крајњег производа, из морске воде, као ресурс. Од открића магнезијума од стране Сир Хумпхри Дави-а 1808, производња електролитског магнезијума била је главна метода која се користи у производњи метала магнезијума. Међутим, електролиза безводног магнезијума показује да је хлорид стандардни начин производње. Од тада је препознавање процеса постало широко распрострањено у примени. Већина великих погона за производњу магнезијума у свету данас користи електролитички процес, који углавном захтева магнезијум хлорид као сировину и користити електричну струју да то претвори у магнезијум метал и гасни хлор. С друге стране, постоји неколико главних термичких процеса који су коришћени за производњу магнезијума током протеклог периода. Применом средства, као што је силицијум, користи се за смањење магнезијумових оксида под вакуумом. Магнезијумови оксиди су у основи изведени из доломита ($\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$) и магнезита (MgCO_3).

3. Легуре магнезијума

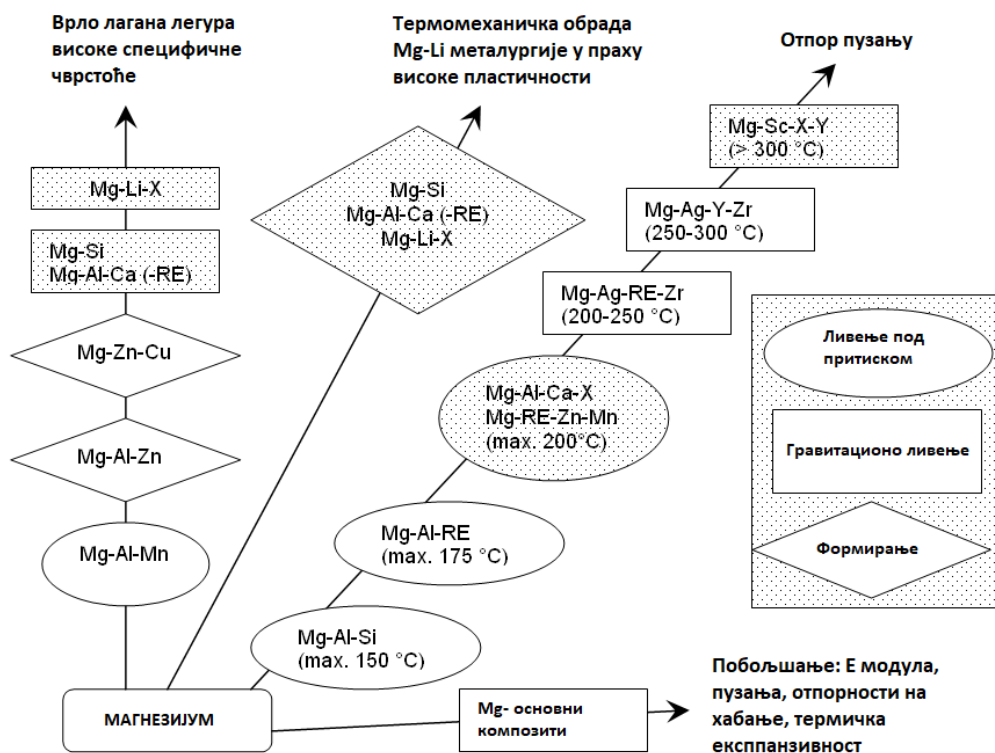
Легирањем са алуминијумом, цинком, манганом и другим елементима побољшавају се механичка својства магнезијума, те се магнезијумове легуре употребљавају као конструктивни материјал у низу техничких примена. Једно од најважнијих својстава магнезијумових легура јесте мала густина ($1,8 \text{ g/cm}^3$) која је условила њихову знатну примену у авионској индустрији, ракетној техници и саобраћајним средствима. Магнезијумове легуре нарочито добро подносе динамичка оптерећења. Оне имају добра ливачка својства (легуре за ливење), те се ливењем могу добити предмети веома сложеног облика. Велики је недостатак магнезијумових легура њихова мала постојаност према корозији у атмосфери влажног ваздуха, у слаткој и морској води. Оне интензивно кородирају у органским и минералним киселинама (са изузетком хромне и флуороводоничне) и растворима њихових соли. Јони хлора убрзавају корозију тих легура у воденим растворима. Магнезијумове легуре постојане су у растворима флуорида, хромата и дихромата, у минералним уљима, нафти, бензину и керозину, а слабо кородирају и у разблаженим растворима алкалија. Због лоше корозионе отпорности, делови израђени од легура магнезијума заштићују се од корозије оксидацијом и бојењем. Магнезијумове легуре, које се производе индустријски, припадају групи бинарних и вишекомпонентних система. Најчешћи легирајући елементи јесу алуминијум, цинк, манган, силицијум, калцијум, кадмијум, церијум, цирконијум, торијум и елементи ретких земаља, од којих су најважнија прва 4 елемента. Легирајући елементи граде са магнезијумом чврсте растворе и интерметална једињења (нпр. Mg_4Al_3 , Mg_{31}Zn , $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}\text{Zn}_2$, Mg_2Si итд.). Основу већине легура чине чврсти раствори.

Интерметална једињења, ако се и образују, садржана су у веома малим количинама јер су обично крта и осетно утичу на смањење пластичности. Легуре магнезијума производе се поступком легирања у стопљеном стању. За добијање легура задовољавајућег квалитета од велике је важности чистоћа полазног металног магнезијума. Метални магнезијум треба да садржи најмање 99,7% Mg. Ако је садржај примеса већи од 0,3%, у току топљења, а пре легирања, магнезијум се рафинише уз додатак рафинационих топитеља. Ако се као полазна сировина узима секундарни магнезијум у облику племенитих отпадака (лоши одливци, делови уливних система, отпаци при пластичној преради итд.) или неплеменитих отпадака (магнезијум који је био у употреби), шаржу је потребно најпре припремити. Неке од предности легура магнезијума су:

- Најнижа густина од свих металних конструкционих материјала,
- Добра ливкост, погодна за високе притиске ливења,
- Добра заварљивост,
- Знатно побољшану отпорност на корозију,
- У поређењу са полимерним материјалима боља механичка својства, отпоран на старење, боља електрична и топлотна проводљивост, рециклажа.

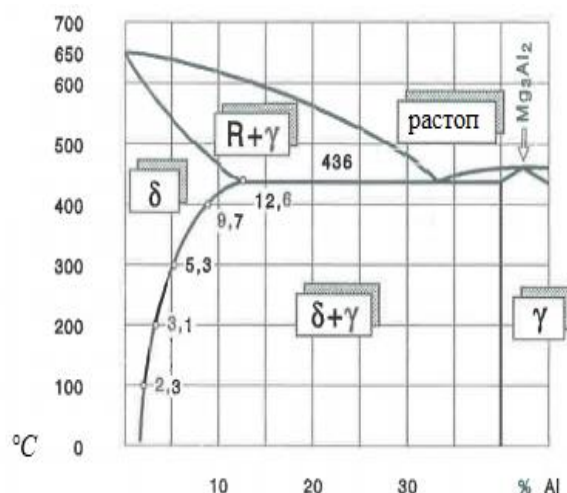
Један од разлога за ограничену употребу магнезијума су његови недостаци:

- Лимитирана хладна обрадивост и чврстоћа,
- Лимитирана висока чврстоћа и отпорност на пузање на повишеним температурама,
- Висока хемијска реактивност.



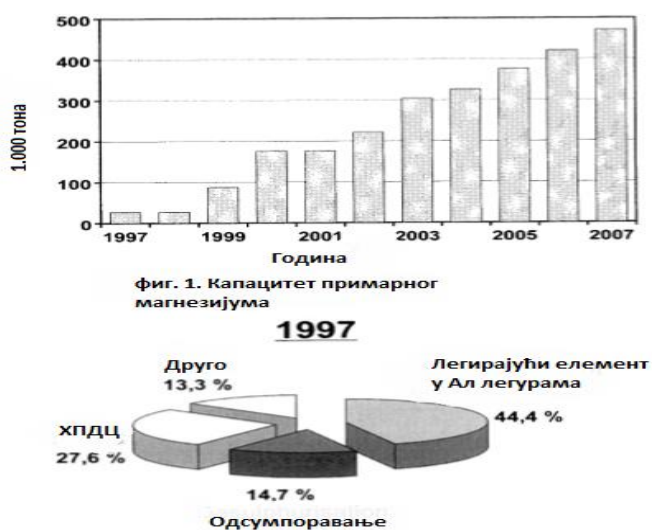
Слика 3.1 Легуре магнезијума са разним легирајућим елементима

Најчешће коришћене легуре магнезијума заснивају се на систему **Mg-Al**. **Алуминијум** има предност релативно ниске цене и побољшава чврстоћу и ливкост. Алуминијум је такође елемент мале густине који узрокује само незнатна повећања густине легура магнезијума. Слика 3.2 представља приказ комерцијалне легуре које спадају у опсегу 2–9% Al. На доњем крају овог распона композиције, ливење постаје тешко, док изнад 9% Al, легуре постају ломљиве. Повећани садржај алуминијума побољшава ливкост, али смањује дуктилност и ударну чврстоћу. Легуре са већим садржај алуминијума као што је AZ91 често се бирају због њиховог одличног понашања при ливењу које омогућава ливење великих сложених делова са танким зидовима. Легуре са нижим процентом алуминијума као што су AM20, AM50 и AM60 бирају се тамо где су дуктилност и енергија удара јако битне. Поједини елементи нечистоћа, нарочито гвожђе, бакар и никал, имају штетан утицај на њих. На пример, спецификација за AZ91 поставља максимуме од 0,005% Fe, 0,002% Ni, и 0,030% Cu (Слика 3.2).



Слика 3.2 Део дијаграма стања магнезијум-алуминијум

Поступак добијања легура састоји се из фазе топљења са рафинацијом и фазом легирања или без њих. У лонац за топљење шаржира се прво, ако је потребно, топитељ (око 1/3), а затим метални магнезијум, и то прво метални блокови па затим повратни материјал. Када отпочне топљење, метал се покрива топитељима како би се спречило запаљење метала, а када се стопи сав метал, изводи се рафинација. По завршеној рафинацији приступа се легирању убацивањем легируних компонената у растопљени магнезијум. Алуминијум и цинк лако се растварају у стопљеном магнезијуму. Теже топиви метали (манган, цирконијум, торијум, ретке земље) додају се у растопљени магнезијум помоћу предлегура. То су двокомпонентне богате легуре магнезијума и метала којим се жели легирати, а производе се у посебним пећима. Легуре се изливају на одређеној температури, која зависи од састава легуре. Површина легура покривена је топитељима, а да се спречи оксидација при ливању, струја метала покрива се прахом елементарног сумпора. Примена магнезијумових легура веома је разноврсна. Око 60% укупне производње магнезијума троши се у облику различитих легура, од којих су око 35% легуре за ливење, а око 25% легуре које се пластично прерађују до коначних производа. Додатак легирајућих елемената у чистом магнезијуму помаже у промени његових својстава. Магнезијум је хемијски активан и може да реагује са другим легирајућим елементима са којима ствара интерметална једињења. У већини магнезијумових легура присутно је интерметално једињење.

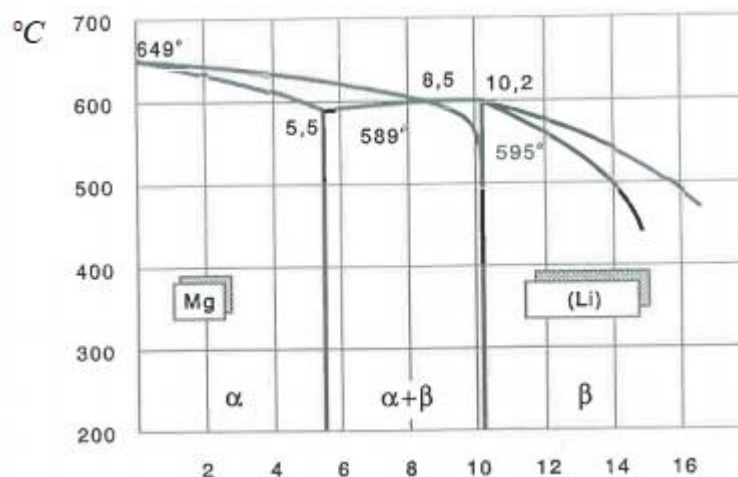


Слика 3.3 Доделивање магнезијума металуршким апликацијама

Алуминијум је најчешће коришћени легирајући елемент и чини основу за легуре код ливења под притиском. Максимална растворљивост је 11,5% , а легуре веће од 6% могу се термички обрађивати. Алуминијум побољшава чврстоћу, примећује се оптимална комбинација чврстоће и дуктилности од око 6%. Легуре се лако лију. Отпор пузању је ограничен због лоше температуре. Неколико система садржи Al до 10%, нпр. AZ, AE, AM и AS. У систему Mg-Al алуминијум је један од ретких метала који се лако раствара у магнезијуму. Граница растворљивости алуминијума на еутектичкој температури је 11,5% и пада на око 1% на собној температури. Сходно томе, Mg17Al12 игра доминантну улогу у одређивању својстава комерцијалне легуре на бази Mg-Al укључују даље легирање додатком цинка нпр AZ91, AZ81 и AZ63.

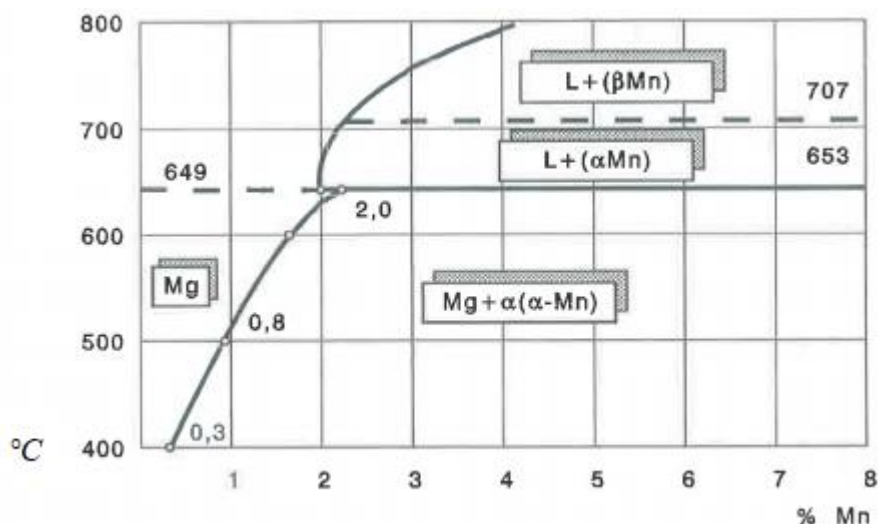
Легирање **калцијумом** постаје све чешће у развоју јефтине легуре отпорне на пузање - у основи замењујући Mg17Al12 са Al12Ca. Иначе Ca може деловати као деоксиданс у топљењу или у каснијој топлотној обради. Побољшава се способност ваљања лима, > 0,3%, може смањити способност заваривања.

Литијум је једини легирајући елемент који смањује густину легура магнезијума. Поред тога, растворљив је до 17,0% , а та вредност се задржава углавном на собној температури. Додавање Li смањује чврстоћу, али повећава дуктилност. Еластичне константе су такође донекле побољшане (Слика 3.4).



Слика 3.4 Дијаграм стања легуре магнезијум-литијум

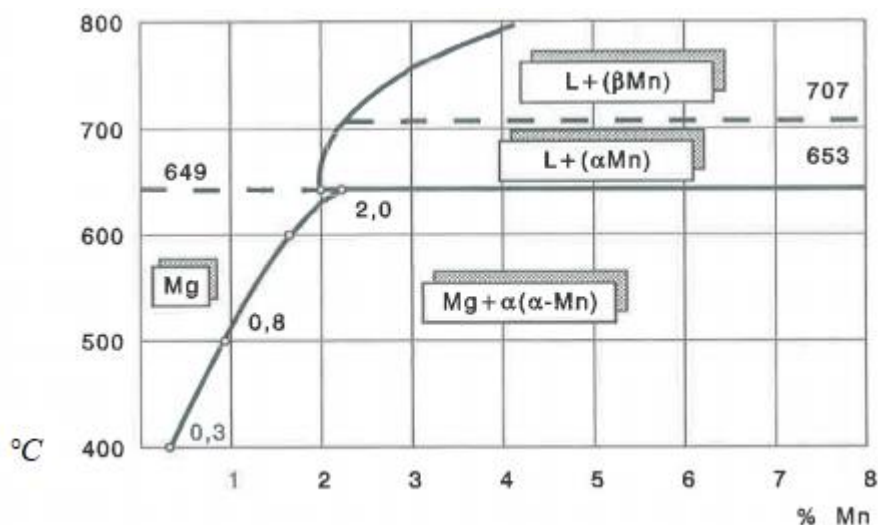
Манган се обично не користи сам, већ са другим елементима, нпр. Al. Тако настају легуре MnAl, MnAl6 или MnAl4. Смањује растворљивост гвожђа и производи релативно нешкодљива једињења. Повећава чврстоћу и побољшава корозијску отпорност легура MgAl и MgAlZn на слану воду. Бинарне легуре користе се у отковцима или екструдираним шипкама. Максимум количина мангана је 1,5–2%. Због тога већина легура магнезијума има додатке мангана. Слика 3.5



Слика 3.5 Дијаграм стања легуре магнезијум-манган

Додатак **торијума** пружа отпор пузању - до 350 °C. Легуре се могу заварити. Његова употреба се поступно укида због тога што је торијум радиоактиван.

Цинк је један од најчешћих додатака за легирање. Користи се заједно са Al (нпр. AZ91 или са цирконијумом, торијумом). Цинк је важан елемент за легирање, али ретко служи као главни елемент за легирање (легуре ZK, ZH, ZM, ZC и ZE). Може се користити са легурама које садрже торијум, итријум или њихове комбинације, али не и у легурама које садрже алуминијум. Додаци цинка у легуре на бази Mg-Al, као што је AZ91, обично су 0,5–1% Zn. Цинк побољшава флуидност и обезбеђује одређено повећање тврдоће и чврстоће (Слика 3.6).

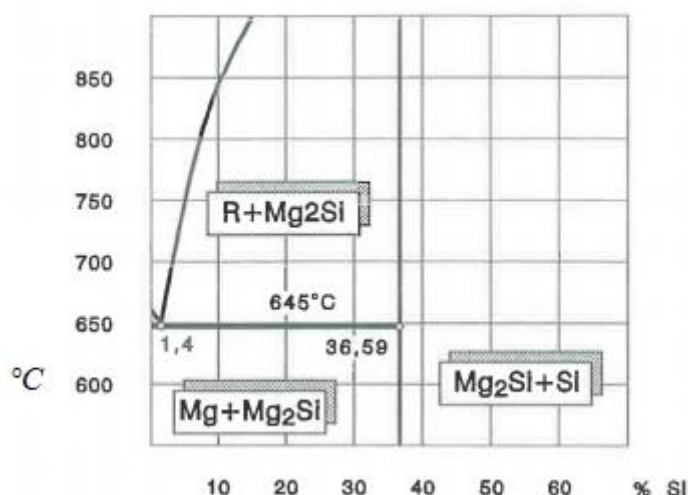


Слика 3.6 Дијаграм стања легуре магнезијум-цинк

Итријум се користи за побољшање високе температуре, чврстоће и отпор на пузање до 300 °C.

Сребро повећава реакцију очвршћавања на старење и својства високе температуре. Замена сребра другим металом I групе, нпр. бакром, није дала исти ефекат. Произведена својства премашила су доступне савремене легуре на температурама до 250 °C.

Силицијум се додаје ливеним легурама за побољшање својстава повишене температуре са уобичајеним легурама AS21 и AS41 које су оригинално развијене за употребу код компоненти мотора (Слика 3.7).



Слика 3.7 Дијаграм стања легуре магнезијум-силицијум

Бакар има ограничену растворљивост у магнезијуму. Он реагује са магнезијумом дајући Mg_2Cu интерметална једињења. Студије су показале да додавањем бакра у магнезијум помаже у повећању јачине на високим температурама међутим, дуктилност је угрожена.

Никал има ограничену растворљивост у магнезијуму. Убацавање никла у магнезијум доводи до стварања Mg_2Ni легуре и повећање чврстоће на собној температури (у смислу повећања 0,2% течења и крајње чврстоће).

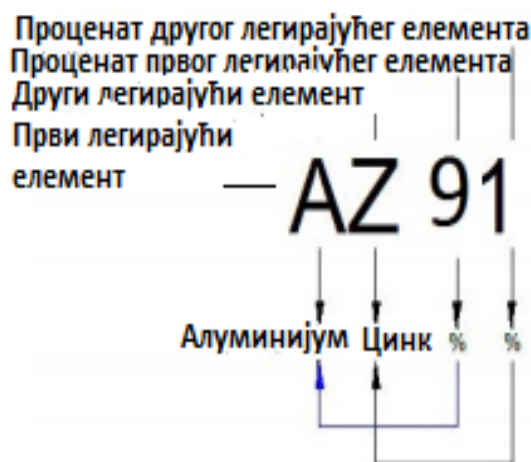
3.1 Означавање магнезијума и његових легура

Легуре магнезијума се означавају хемијским симболом магнезијума Mg уз навођење хемијског симбола главног легирајућег елемента и његовог средњег састава и евентуално хемијског симбола другог легирајућег елемента и његовог средњег састава. Пример, $MgAl_3Zn_1$. Имена легура магнезијума често се дају по два слова која следе два броја. Почетна слова говоре о главним легирајућим елементима (A= алуминијум, Z= цинк, M= манган, S= силицијум). Бројеви означавају одговарајуће називне саставе главних легирајућих елемената. Означавање AZ91, на пример, садржи легуре магнезијума са приближно 9 тежинских процената алуминијума и 1 проценат тежинског цинка. Тачан састав треба потврдити из референтних стандарда. Систем означавања легура магнезијума није тако добро стандардизован као у случају челика или легура алуминијума. Већина произвођача следи систем користећи једно или два слова префикса, два или три броја и суфикс. Префикси слова означавају два главна легирајућа метала. Бројеви одговарају заокруженом проценту два главна елемента легуре [12]. Табела 5 приказује кључна слова за сваки расположиви легирајући елемент. Последње слово на сваком идентификационом броју означава степен развоја легуре (A, B, C, ...). У већини случајева ова слова показују степен чистоће. На пример, легура AZ91D је легура са називним садржајем од 9% алуминијума (A) и 1% цинка (Z). Његова развојна фаза је 4 (D). Одговарајућа спецификација би била $MgAl_9Zn_1$. ASTM диктира следећи састав (све тежинске вредности %): Al 8,3–9,7; Zn 0,35–1,0; Si макс. 0,10; Mn макс. 0,15; Cu макс. 0,30; Fe макс. 0,005; Ni макс. 0,002; остали макс. 0,02. Гвожђе, никл и бакар имају огромне негативне ефекте на отпорност на корозију и стога су ове вредности строго ограничене.

Табела 5. ASTM кодови за легуре магнезијума

Почетно слово	Елементи легуре	Почетно слово	Елементи легуре
A	Алуминијум	N	Никл
B	Бизмут	P	Олово
C	Бакар	Q	Сребро
D	Кадмијум	R	Хром
E	Ретке земље	S	Силицијум
F	Гвожђе	T	Лим
N	Ториум	W	Итриум
K	Цирконијум	Y	Антимон
L	Литијум	Z	Цинк
M	Манган		

У Сједињеним Државама легуре магнезијума се означавају са два велика слова, после којих следи две или три цифре. Слова представљају два најбитнија елемента легуре. Прво слово означава састојак који је највише присутан у тој легури, а друго слово означава елемент у легури који следи. После словне ознаке, први број означава тежински проценат првог елемента (у случају да постоје само 2 цифре). Друга цифра означава тежински проценат другог елемента. Ако нека слова следе и после тих бројева, то значи да је у питању одређена модификација дате легуре (Слика 3.2).



Слика 3.8 Обележавање магнезијумових легура

Међународна ASTM ознака за легуре магнезијума састоји се из четири дела:

- Први део- Означава два главна елемента за легирање. Састоји се од две шифре које представљају два главна елемента за легирање распоређена по редоследу смањивања ако су проценти различити (или абecedно ако су проценти једнаки).
- Други део- Означава количине два главна елемента за легирање. Састоји се од два броја која одговарају заокруженим процентима два главна елемента за легирање и поређани истим редоследом као ознака легуре у првом делу. Цели бројеви.
- Трећи део- Поставља разлику између различитих легура са истим процентима два основна елемента за легирање. Састоји се од слова абeцеде додељеног по редоследу када састав постане стандардан:
 - A- први састав регистрована код ASTM,
 - B- други састав регистрована код ASTM,
 - C- трећи састав регистрована код ASTM,
 - D- висока отпорност на корозију,
 - X- експерименталне легуре - нерегистроване код ASTM.

- Четврти део- Указује на стање. Састоји се од слова праћеног бројем (одвојен од трећег дела ознаке цртицом)

Табела 6. Ознаке термичке обраде за легуре магнезијума

Општа подела
F - Сирово стање
O - Жарено, рекристалисано (само за коване производе)
H - Деформационо ојачање
T - Термички третирано за постизање стабилне чврстоће (осима за F, O, H)
V - Термички обрађено растворним жарењем
Подподела за "H"
H1, плус једна или више цифара- Само деформационо ојачање
H2, плус једна или више цифара- Деформационо ојачано и делимично жарено
H3, плус једна или више цифара- Деформационо ојачано и затим стабилизовано
Подподела за "T"
T1 – Хлађено са температуре обликовања и природно старено
T2 – Жарено (само за одливке)
T3 – Растворно жарено и хладно деформисано
T4 – Растворно жарено и природно старено до стабилног стања
T5 – Хлађено са температуре обликовања и вештачки старено
T6 – Растворно жарено и вештачки старено
T7 – Растворно жарено и стабилизовано
T8 – Растворно жарено, хладно деформисано и вештачки старено
T9 – Растворно жарено, вештачки и хладно деформисано
T10 – Хлађено са температуре обликовања, вештачки старено и хладно деформисано

4. Обрадивост магнезијума и његових легура

Магнезијум и његове легуре могу да се обрађују ливењем или деформисањем. Ливене легуре магнезијума су увек преовладавале над кованим легурама, посебно у Европи где традиционално чине 85–90% свих производа. Први легирајући елементи који су се комерцијално користили били су алуминијум, цинк и манган, а систем Mg–Al–Zn и они се и даље најчешће користе за одливке. Прва кована легура била је Mg1,5Mn али овај материјал је данас углавном замењен другим легурама. Још један проблем раних одливака од легуре магнезијума био је величина зрна које је имало тенденцију да буде велика и променљива, што је често резултирало лошим механичким својствима, микропорозношћу и, у случају кованих производа, прекомерном усмереношћу својства. 1937. у Немачкој, откривено је да цирконијум има интензиван ефекат уситњавања зрна магнезијума. Ово је довело до развоја потпуно нове серије ливених и кованих легура магнезијума легираних са цирконијумом које имају знатно побољшана механичка својства.

Због широке примене магнезијумових легура, неопходно је добити поуздан процес спајања. Легуре магнезијума спајају се разним методама заваривања укључујући ТИГ поступак, затим МАГ поступак, плазма и ласер поступак, тачкасто заваривање и тако даље.

4.1 Заваривање

Магнезијум се заварује у атмосфери инертних гасова техником лучног заваривања волфрамовом електродом, и техничком електроотпорног заваривања. Као електроде за заваривање употребљавају се легуре магнезијума истог састава као и легура која се заварује. Приликом електролучног заваривања минимална дебљина на месту вара треба да износи 0,8 mm. Варови неких магнезијумових легура, посебно легура магнезијум-алуминијум-цинк и легура које садрже >1% Al, узрок су тзв. напонске корозије, те се термички обрађују ради смањења напона у материјалу. Легуре магнезијума се могу користити за израду заварених делова или елемената конструкција. Основни проблем заварљивости легура магнезијума је реакција магнезијума и његових легура са кисеоником, а настали оксиди због своје знатно веће густине ($3,65 \text{ kg/dm}^3$) теже се одстрањују из шавова, ради чега се препоручује заваривање у заштитној атмосфери. Други значајан проблем је велики температурни интервал кристализације, што изазива знатну појаву хладних прслина. Гасним заваривањем се најбоље заварује легура типа МА1, а додатак легури на пример калцијума (легура типа МА9) значајно се погоршава заварљивост. Ако легура у себи има већи садржај од 5% алуминијума или 1% цинка онемогућено је гасно заваривање.

Заваривање магнезијума и легура магнезијума захтева одређене особине које које поседује сам магнезијум као и његове легуре:

- Веома мала густина, $1,74 \text{ g/cm}^3$,
- Легуре $1,12 - 1,8 \text{ g/cm}^3$ у зависности од легирања (од Li, преко Al, Th, Zn, Zr, Mn, Sn, ...),
- Li даје екстремно ниску густину,
- Al, Zn, Zr... -обезбеђују таложно ојачање.

Поступци заваривања магнезијума су: Гасно (са редукујућим пламеном), TIG/MIG, заваривање ласером, LATIG= ласером + TIG и тачкасто електроотпорно

заваривање. Код заваривања магнезијума и његових легура, неопходно је поштовати одређене генералне препоруке:

- Употреба топитеља да оксид преведе у троску,
- Обавезно детаљно чишћење троске јер је корозивна,
- Употреба додатног материјала што сличнијег хемијског састава основном материјалу,
- Могућа је и употреба додатног материјала чија је температура топљења нижа – тиме шав остаје течан – касније пластичан и када је основни материјал очврснуо,
- Предгревање на температуру 250-300⁰С за спречавање појаве врућих прслина,
- Жарење за смањење заосталих напона.

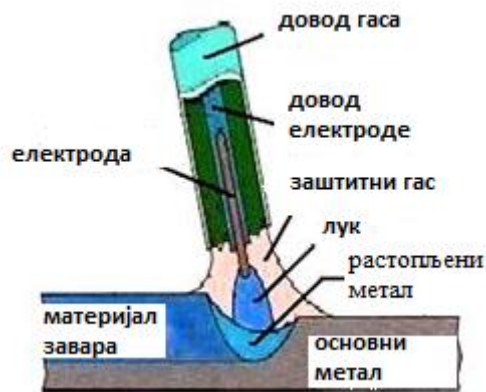
Као и код других поступака обрадивости, доста пажња мора се посветити мерама предострожности. Посебна пажња мора се посветити заштити од пожара, посебно код легура блиских технички чистом Mg. Пожар не сме да се гаси водом $Mg + 2H_2O \rightarrow Mg(OH)_2 + H_2$ (водоник интензивира пожар!!!). Пожар не сме да се гаси са CO_2 : $2Mg + CO_2 \rightarrow 2MgO + C$. Пожар се сме гасити песком и уређајима класе D (NaCl, графит, Cu, Na₂, CO₃). [13]

Поступак TIG/MIG

Ови поступци се могу изводити са или без додатног материјала. Потребно је обратити пажњу на унос топлоте – не сме бити превелик унос, око 2/3 у односу на Al. Обично се користи Ar као заштитна атмосфера. Могуће је користити и специфичан поступак TIG заваривања са топитељима, чиме се приближно два пута повећава дебљина материјала који се може заваривати (замена V шава са I), брже извођење, мањи трошкови (слике 4.1 и 4.2) [16]. Примена заваривања у заштитној атмосфери, на пример у заштити аргона (TIG/MIG) омогућује да се легура типа MA1, MA2, MA2-1, MA8 и MA13 могу користити за сложене заварене делове конструкције.



Слика 4.1 Принцип TIG заваривања



Слика 4.2 Принцип MIG заваривања

Заваривање ласером

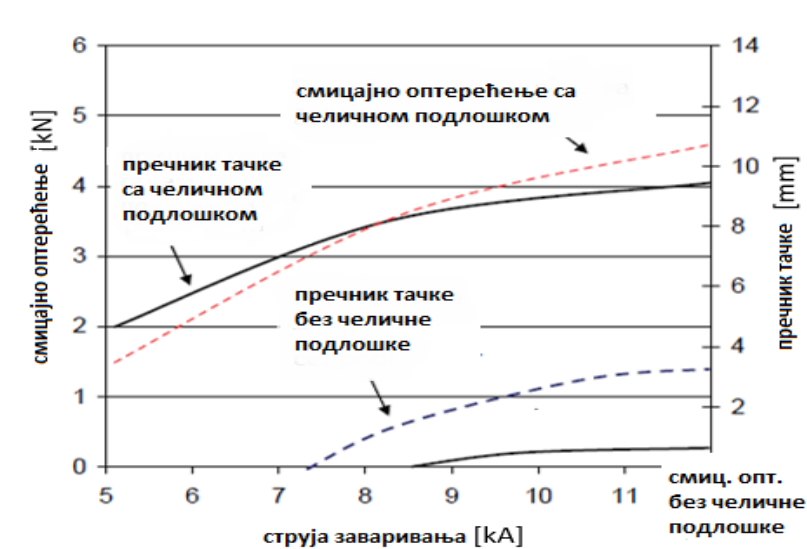
Овај поступак заваривања представља врхунски квалитет. Поседује узан ZUT, мале деформације, користи се за мале дебљине и један је од скупљих поступака.

TIG/ласер (LATIG)

Поседује већу брзину заваривања и од TIG-а и од заваривања ласером. Двоструко већа дебљина основног материјала у односу на TIG и четири пута у односу на ласерско заваривање. [14]

Тачкасто електроотпорно заваривање

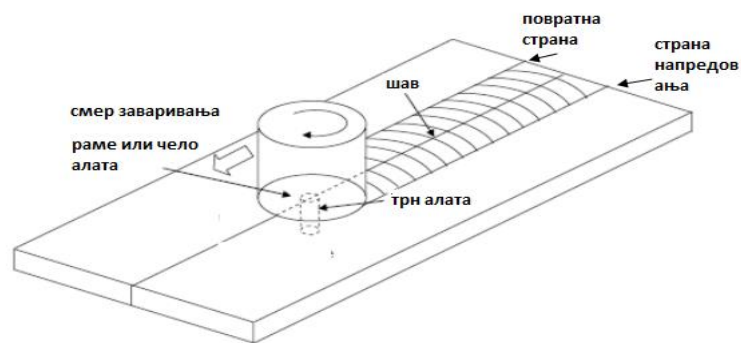
Овај поступак је погодан за аутоматизацију, захтева примену челичних подлошки за повећање уноса топлоте и повећање пречника заварене тачке (слика 4.3). Легуре магнезијума за гњечење се добро заварују тачкастим и шавним поступком заваривања.



Слика 4.3 Дијаграм тачкастог електроотпорног заваривања

Заваривања трењем

Једна од најчешће примењиваних метода заваривања легура магнезијума је метода заваривања трењем са мешањем. Ова нова метода заваривања обезбеђује остваривање висококвалитетних спојева, посебно код тешко заварљивих материјала попут легура алуминијума и легура магнезијума, као и код легура алуминијум-цинк-магнезијум. Такође, овом методом успешно се заварују и разнородни материјали, као што су легуре алуминијума и легуре магнезијума. При заваривању ових легура са применом оптималног алата и при оптималним режимима заваривања могуће је добити заварени спој који по чврстоћи превазилази основни материјал. Основни разлог постизања високих механичких особина лежи у уситњавању зрна унутар централне зоне и осталих зона. Заваривање трењем са мешањем је примењено у многим индустријским секторима, као што је авио, железничка и ауто индустрија. Заваривање трењем са мешањем (ZTM Енг. Friction Stir Welding – FSW) (слика 4.4), представља поступак заваривања у чврстом стању које подразумева употребу трећег тела, односно наменског алата за спајање два дела. Шема поступка ZTM заваривања приказана је на слици (слика 4.4).



Слика 4.4 Шема поступка ZTM заваривања

Топлота се генерише на контактної површини алата и плоча услед трења због ротације и транслације алата, а спајање врши услед дејства трна алата. Оптимална температура ZTM је приближно 0,8 температуре топљења. Управо ова чињеница узрокује погодност за заваривање тешко заварљивих легура и разнородних материјала. Примера ради, ZTM је показао значајне предности у односу над TIG-ом (заваривање нетопљивом електродом у заштити инертног гаса) поступком при заваривању таложно ојачаних легура 7ННН и 2ННН (Al – Zn – Mg и Al – Cu) код којих топљење узрокује распад и растварање талоба ливеном сктруктуром карактеристичном за заварене спојеве добијене топљењем (3-7). Такође, при заваривању лако заварљивих легура попут 5ННН (Al – Mg), постижу се врло високе ефикасности спојева које могу превазићи 100%, односно, заварени спој поседује већу затезну чврстоћу у односу на основни материјал. [15].

Легуре магнезијум за ливење које се најчешће заварују су:

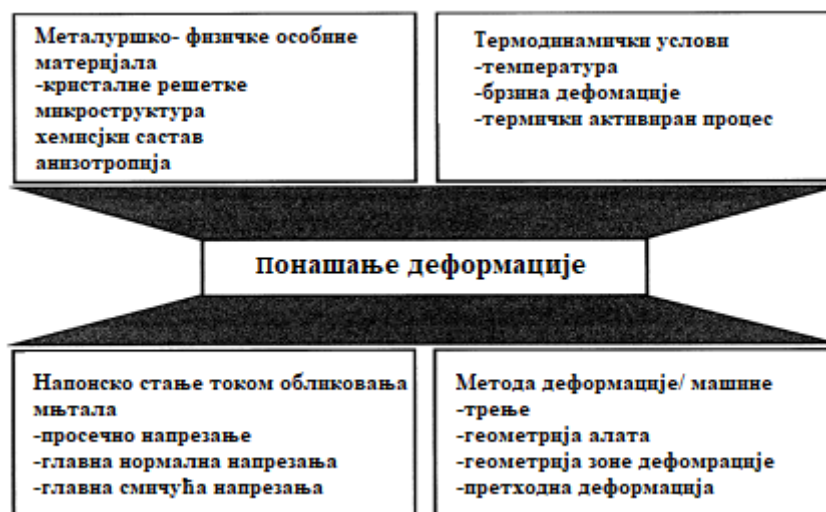
- ZS63 (Mg – Sn – Mn) – одливци са високим заптивањем,
- EZ33 (Mg – Zn – Zr) – одливци са високим заптивањем, отпорна на пузање до 250°C,
- HK31/32 (Mg- Zr – Th) – ливење у песку, отпорна на пузање до 350°C,
- QH21 (Mg – Zr – Th – ел.рет.земље) – одливци са високим заптивањем, отпорна на пузање до 300°C,
- WE43 (Mg – Zr – Y – ел.рет.земље) – релативно висока чврстоћа и дуктилност.

Легуре магнезијума за пластичну деформацију које се најчешће заварују:

- Z1 (Mg – Zr) – ниска / средња чврстоћа, отпорна на корозију,
- AZ31 (Mg – Al – Zn – Mn) – средња чврстоћа, добра деформабилност,
- AZ61 (Mg – Al – Zn – Mn) – високе чврстоће,
- HK31 (Mg – Cu – Th) – отпорност на пузање до 350°C,
- HM21 (Mg – Th – Mn) – отпорност на пузање до 350°C (ограничено време до 425 °C),
- HZ11 (Mg – Th – Zn – Zr) – отпорност на пузање до 350°C (ограничено време до 425°C).

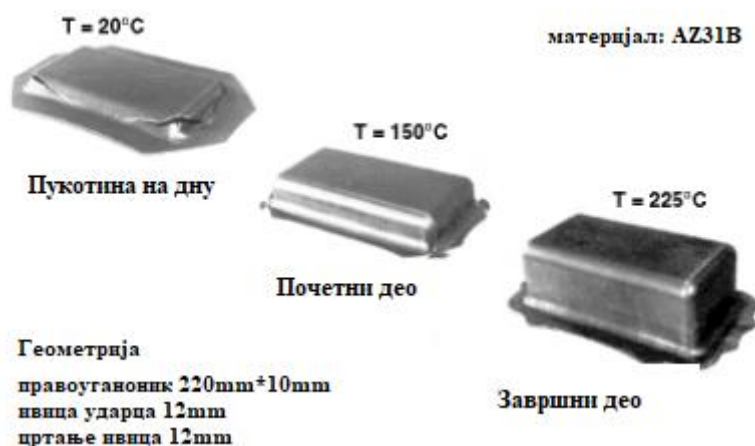
4.2 Обрада деформисањем

Критични фактор за деформацију магнезијума је температура, будући да магнезијум показује само ограничену способност обликовања на температури околине. Изнад 220 °C, међутим, клизне равни постају термички активирани и магнезијум постаје високо деформабилан. На слици 4.5 наведени су основни фактори утицаја на деформабилност у обликовању врућих метала према Спиттел-у који углавном важе и за магнезијум.



Слика 4.5 Параметри за обликовање каљеног метала

Из литературе се мало зна о дубоком извлачењу и самом процесу извлачења магнезијума. AZ31 легура је погодна за дубоко извлачење. Због ограничене деформабилности која произлази из хексагоналне решетке, предложене су мале брзине деформације и велики прелазни радијуси. Даљи предлози у вези са геометријом алата за савијање и дубоко извлачење магнезијума AZ31 је дала компанија Dow Chemical Company. Савијање и дубоко извлачење могуће је одрадiti на собној температури када је правилна геометрија алата. Понашање при деформацији танких лимова, израђених од легуре AZ31, зависи од температуре (слика 4.6). Употреба правоугаоне геометрије алата доводи до раног отказивања материјала услед стварања пукотина. Повећање температуре на 150 °C омогућило је потпуно обликовање дна са истим односом извлачења као и раније. Међутим, ограничена деформабилност довела је до унутрашњих пукотина прирубница на дубини истезања од приближно 35 mm на још вишим температурама, а нагли пораст деформабилности AZ31 примећен је између 150 и 200 °C.



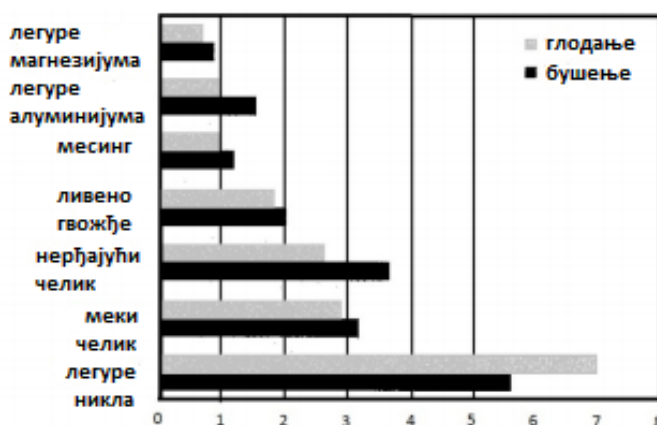
Слика 4.6 Понашање легуре магнезијума AZ31 осетљиве на температуру

4.3 Механичка обрада

Магнезијум је најлакши конструкциони метал и показује одличну механичку обрадивост. Неке од предности обраде магнезијума у поређењу са другим често коришћени металима укључују:

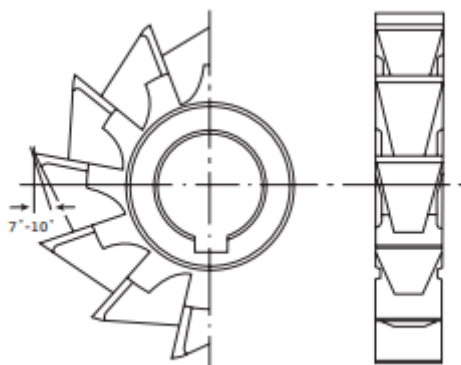
- Потребна је мала снага - приближно 55% у односу на Al,
- Брза обрада - коришћење високе брзине резања, и веће дубине реза,
- Одлична завршна обрада површине - постигнута изузетно фина и глатка површина,
- Смањено хабање алата - доводи до дужег века трајања алата.

Препоручене брзине алата су засноване на употреби HSS алата. Према томе, ово нису нужно максималне брзине могуће за одређене операције. Треба их користити као водич заједно са параметрима брзине и дубине резања.



Слика 4.7 Енергија потребна за обраду магнезијумових и осталих легура

Могуће су изузетно велике брзине резања легура магнезијума при чему се и даље добија одличан квалитет површине завршне обраде. Као и код стругања, HSS алати се могу користити при нормалним брзинама, али карбид је материјал алата који се бира за брзе операције глодања. Умeci од тврдог метала су посебно погодни за употребу у операцијама глодања. Глодала код обраде магнезијума би требало да имају половину до трећину броја резних ивица у односу на конвенционалне алате за глодање који се користе на другим металима попут челика. Алати са мањим бројем зуба помажу у чишћењу и одбацивању струготине и такође смањују топлоту трења повезану са већим бројем зуба о радни комад. Једноставна врсте глодала за обраду магнезијума приказана је на слици 4.8.



Слика 4.8 Глодало за обраду магнезијума

Брзине, помаци и дубине резања за операције глодања дате су у табели. Брзина је ограничена само стабилношћу радног предмета, брзином окретања вретена и тачности машине. Брзина резања има мало утицаја на површинску обраду. Употреба расхладне течности је обично непотребна.

Табела 7. Брзине, помаци и дубине реза за глодање магнезијума

Операција	Брзина m/min	Помак m/min	Макс. дубина реза
Груба обрада	До 275	250-1250	до 12
	275-450	250-1500	до 10
	450-900	375-1900	до 5
Фина обрада	До 275	250-1250	до 275
	300-900	250-1750	0.13-1.3
	900-1500	250-2250	0.07-0.7
	1500-2750	250-3000	0.07-0.7

Иако се магнезијум може бушити стандардно, употреба посебно дизајнираних или модификованих бушилаца су од велике користи за већу тачност која се при томе постиже.

Бургије за дубоко бушење имају угао завојнице око 47° (слика 4.9) ако се користи расхладна течност. Спирала бургије са полираним површинама које олакшавају проток струготине погодније су за коришћење без расхладна течности. врха резних ивица бургије треба да буду 135° - 150° , ово минимизира спиралу и такође побољшава завршну обраду површине. Као алтернатива расхладном средству може се користити компримовани ваздух који се користи за хлађење бургија и уклањање струготине у дубоким отворима. За фине поступке бушења боља завршна обрада површине и већа тачност димензија може се постићи коришћењем уља, а не расхладног средства типа емулзије.



Слика 4.9 Бургија за дубоке руне

4.4 Термичка обрада

Термичка обрада је поступак обраде метала и легура загревањем до одређене температуре и хлађењем да би се извршила промена структуре и добила одговарајућа механичка својства. У зависности од врсте материјала и потребних својстава одређују се методе и режим термичке обраде. Свака метода термичке обраде представља скуп операција које се могу обавити једноставним или комбинованим процесом по одређеном режиму обраде. Основни захтеви режима термичке обраде односе се на: температуру загревања, начин загревања, време загревања и брзину хлађења. Метали и легуре имају кристалну структуру. У кристалној структури атоми су правилно распоређени просторно и међусобно повезани у систему кристалних решетки. Атоми осцилују око својих равнотежних положаја у хладном и топлом стању. У процесу хлађења и загревања може доћи до померања атома у кристалној решетки. Три основне врсте термичке обраде које се обично примењују на легурама магнезијума. То су:

- Потпуно жарење,

- Рекристализационо жарење,
- Дисперзионо отврђавање, путем каљења и вештачког старења.

Термичка обрада састоји се у загревању материјала до температуре на којој одређени састојци прелазе у чврсти раствор, а затим хлађењем тако да се ови састојци држе у чврстом раствору током хлађења. За одливке од легура магнезијума температура термичке обраде раствора креће се у опсегу од око 650 до 1050⁰С. Периоди излагања могу бити од, рецимо, 16 до 24 сата. Т4 је третман индициран за одливке који захтевају велику чврстоћу. Поступак старења састоји се у загревању охлађене легуре на умерено повишеној температури да би се извршило таложење саставних делова који се налазе у легури. Температура третмана може бити у опсегу од око 300 до 500⁰С са изложеношћу од 3 до 16 сати. И температура и време зависе од састава и других фактора. Ознака темпатора за термички обрађен материјал је Т6. Т6 третманом развијена је висока тврдоћа. Жарење се састоји у загревању легираног материјала на умереној температури да се изврши рекристализација, или уклоне унутрашња напрезања. Температура жарења за већину хладно обрађених легура магнезијума је око 340⁰С. Унутрашња напрезања обично прате термичку обраду раствора. Одређени производни процеси кованих производа на пример ковање резултирају задржавањем састојака легура у чврстом стању у концентрацијама знатно већим од равнотеже растворљивости на собној температури. То је зато што се врућ отковак хлади на ваздуху. Стабилизација се користи углавном у сврху спречавања или минимизирања на повишеним температурама. Раст је у основи промена запремине која је резултат сједињења састојака који се таложе из чврстих раствора. Стабилизација се може применити на ливење било у F или T4 третману. Уобичајени третман састоји се у загревању производа током 4 сата. То има врло мали утицај на оригинална механичка својства F третмана. Одабрана врста термичке обраде зависи од састава и облика легуре (ливени или ковани) и очекиваних услова рада. Термичка обрада побољшава чврстоћу и резултира максималном чврстином и отпорношћу на ударце. [17] Када се примењује на одливцима, вештачко старење је третман који смањује напон и такође повећава затезна својства и дуктилност, олакшавајући тако неке врсте израде. Модификације ових основних третмана развијене су за специфичне легуре да би се добиле најпожељније комбинације својстава. Механичке особине већине легура магнезијума могу се побољшати термичком обрадом. У већини кованих легура максимална механичка својства развијају се деформацијским очвршћавањем, а ове легуре се углавном користе без накнадне термичке обраде. Повремено, међутим, вештачким старењем значајно ће се побољшати механичка својства. Коване легуре које се могу ојачати термичком обрадом поделом у три опште класе према саставу:

1. Магнезијум – алуминијум,
2. Магнезијум – торијум,
3. Магнезијум – цинк.

Легуре магнезијума које су намењене за рад на повишеним температурама изнад 200⁰С су легуре система Mg-Ce-Mn, Mg-Nd-Mn-Ni, Mg-Th-Mn. Зависно од погодности за рад на вишим температурама разликујемо три групе легура магнезијума, и то: Прва, друга и трећа група. *Прва група* легура за рад на повишеним температурама до 150⁰С, при веома дугом трајању (изнад 100h), а за ту сврху примењују се легуре са повишеном пластичношћу (легура типа МА1) као и друге легуре са већим садржајем алуминијума и цинка, легуре магнезијума средње односно високе чврстоће (типа МА2, МА2-1, МА3, МА5, МВ65-1). *Друга група* легура за дуготрајан рад на повишеним температурама је до 200⁰С, а ту припадају легуре средње чврстоће (типа МА8, МА9). *Трећа група* легура за рад на повишеним температурама 250-350⁰С су легуре са реткоземним елементима као

главним легирајућим елементима (типа МА11, МА13) које се у пракси називају ватроотпорне легуре (Табела 8).

Табела 8. *Механичка својства магнезијумових легура отпорних на повишену температуру*

Ознака легуре	Облик полуфабриката	Стање легуре	R _m -МПа	R _p -МПа	A ₁₀ -%
МА11	Шипка d=25mm	Т6	280	140	10
	Лим 0,8-3 mm	Т6	260	190	10
МА13	Шипке пресоване	Топло пресовано	300	250	5
МА17	Лим	Т8	240	18	6

AlMgSi се може ојачати на два различита начина: *термичком обрадом*, при чему се тврдоћа и чврстоћа повећавају, док се дуктилност и издужење при прекиду смањују. Оба започињу термичком обрадом раствора, а могу се комбиновати и са механичким процесима (ковање), са различитим ефектима. Жарење се одвија на температурама око 510-540 °С, при чему елементи за легирање прелазе у раствор. Гашење се готово увек одвија одмах након тога. Као резултат, легирајући елементи у почетку остају у раствору чак и на собној температури, док се полако хладе стварају талог. *Хладно очвршћавање*: На собној температури поступно се стварају талози који повећавају чврстоћу и тврдоћу. У првим сатима након гашења, пораст је врло висок, у наредних неколико дана све мање, затим тек постепено, али још увек није завршен ни након неколико година. *Веиштакчко очвршћавање*: Материјали се подгревају у пећи на температурама од 80–250 °С (најчешће 150–160 °С). Време очвршћавања је обично око 5-8 сати. Као резултат, легирајући елементи се брже таложу и повећавају тврдоћу и чврстоћу. Што је температура виша, брже се постиже максимална могућа чврстоћа за ову температуру.

4.5 Обрада ливењем

Легуре магнезијума за ливење, које су првенствено намењене за ливење у песку, у кокилама и под притиском, имају у свом саставу легирајуће елементе и то: алуминијум, цинк уз додатак неког од пратећих елемената као што су цирконијум, силицијум, ниобијум и други. Начин ливења одређен је словним ознакама:

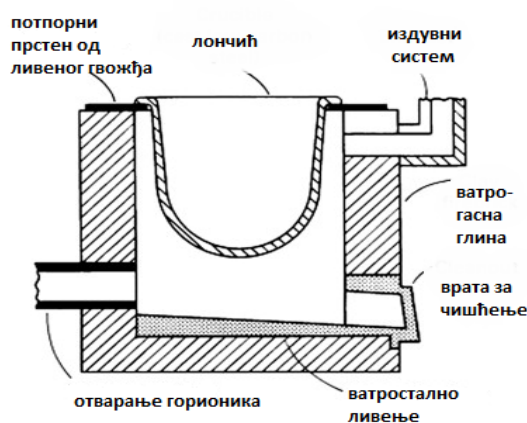
1. G- легуре за ливење у песку,
2. GK- легуре за ливење у кокилама,
3. GD- легуре за ливење под притиском.

Све легуре магнезијума за ливење имају одличну обрадљивост резањем и имају способност за пригушење удара и вибрација. Оне имају и постојаност ударне жилавости на сниженим температурама. Способност ливења- ливкост легура у песку и у кокилама се мало разликују, међутим, код ливења под притиском та разлика је знатна, односно знатно је боља ливкост код лива под притиском. Легуре магнезијума за ливење, због високе склоности ка оксидацији истопљеног магнезијума, условљавају посебне мере опреза. Обрађени или необрађени одливци пре транспорта морају се заштитити од корозије, кондезоване водене паре или од другог утицаја, најчешће потапањем у растворе који садрже хром (или калијум-бихромат). Ако су одливци од магнезијума изложени, чак и врло кратко, агресивним срединама морају се пресвучи квалитетним непорозним филмом. Легуре магнезијума се данас често користе за израду одливака и могу се поделити у три групе:

1. Легуре магнезијума за ливење средње чврстоће, са најмањом затезном чврстоћом на собној температури R_m≥160 МПа,

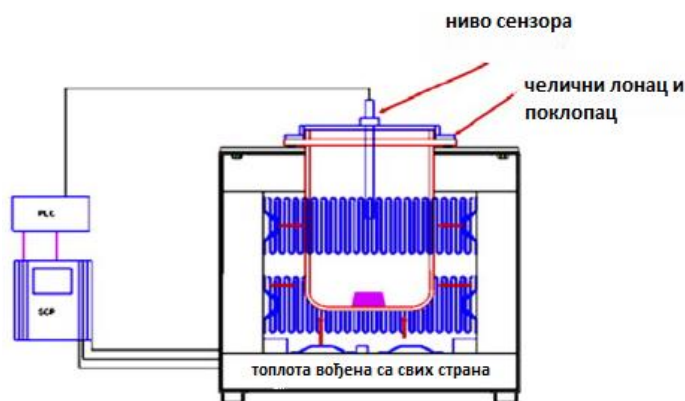
2. Легуре магнезијума за ливење високе чврстоће са најмањом затезном чврстоћом на собној температури $R_m \geq 210 \text{ МПа}$,
3. Ватроотпорне легуре за ливење намењене за рад на повишеним температурама, односно $250\text{--}400^\circ\text{C}$.

Ради добијања готових производа магнезијум и многобројне магнезијумове легуре прерађују се ливењем и пластичном деформацијом (пластичном прерадом). Метални магнезијум добијен електролизом, претапа се у различитим металуршким агрегатима за топљење и при претапању се рафинише. Рафинисани метал обично се лије у блокове стандардизованог облика и тежине. При претапању магнезијум се поред рафинације најчешће и легира, па се легуре, зависно од састава и намене, изливају у блокове погодне форме за даљу пластичну прераду (легуре за пластичну обраду), или ако су у питању магнезијумове легуре за ливење, у калупе од песка или метала. После обраде одливака добијају се готови ливени комади. Производња магнезијумових легура приликом претапања магнезијума релативно је једноставан поступак. Легирајући елементи, као што су алуминијум и цинк, додају се директно у растопљени метал, јер се лако растварају у течном магнезијуму. Теже топиви метали као легиране компоненте додају се у растопљени магнезијум обично помоћу предлегура. Легуре магнезијума имају неке јединствене карактеристике крутости попут одличне динамичности, а самим тим и боље стабилност у односу на остале ливене метале, као што су алуминијум и бакар. Ливење је доминантан производни поступак за легуре магнезијума, који представљају око 98% конструктивне примене магнезијума. Ливење под високим притиском најчешћа је метода ливења легура магнезијума. Такође се разматрају нови процеси као што су ливење под ниским притиском. Растопљени магнезијум не делује на гвожђе на исти начин као и растопљени алуминијум који има висок афинитет према гвожђу. Уобичајна је пракса да се растопљени магнезијум топи и обрађује у челичним лонцима и доставља се операцијама ливења у челичним алатима и уређајима. На слици 4.10 приказује се дизајн попречног пресека типичне стационарне пећи из које се метал за мале одливке може ручно уливати помоћу кадица.



Слика 4.10 Дизајн попречног пресека типичне стационарне пећи на гориво

Ова употреба металних керамичких посуда омогућава да се танак слој залепи одозго помоћу прирубнице, остављајући простор испод лонца. У савременим поступцима ливења углавном се користе електричне пећи са челичним поклопцима и уређајима (механичка пумпа или грејна цев) као на слици 4.11



Слика 4.11 Модерна електрична пећ са челичним поклопцем



Слика 4.12 Метална цев за пренос истопљеног магнезијума у машину за ливење

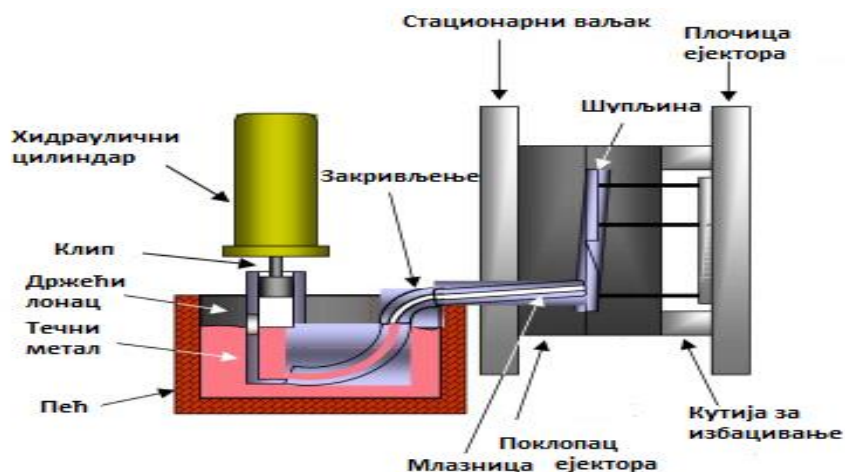
Истопљени магнезијум има тенденцију оксидације и сагоревања, осим ако се не заштити површина од оксидације (слика 4.12). За разлику од легура алуминијума које имају тенденцију да формирју континуирану, непробојну оксидну површину, што огрничава даљу оксидацију, магнезијумове легуре формирају танак пропусни оксидни слој на површини растопљеног метала. То омогућава кисеонику да прође кроз тај слој и подстакне сагоревање испод оксида на површини. Стога је потребна заштита растопљене легуре употребом заштитног гасног поклопца. У основи постоје два главна система, за заштиту течног стања легура магнезијума [18]. Магнезијум и његове легуре не могу се претапати на ваздуху, јер течни метал интензивно реагује са кисеоником и азотом из ваздуха, образујући на површини растопљеног метала слој оксида и нитрида, који је порозан и не штити метал од даље оксидације. Због тога се магнезијум претапа уз додатак заштитних топитеља. Ако се претапа секундарни магнезијум у облику различитих отпадака, отпаци се прво морају припремити одмашћивањем, сортирањем и сушењем. Мање количине магнезијума претапају се у стационарним или нагибним тигл-пећима, загреваним индукционо, електроотпорно, гасом или нафтом. За претапање већих количина магнезијума употребљавају се пламене пећи. Претапање се изводи уз одређени режим шаржирања топитеља и чврстог или течног магнезијума, те одређени режим загревања до температуре топљења и ливења. Потрошња топитеља за топљење, пречишћавање и покривање метала износи 5- 20% од тежине магнезијума. Пошто се заврши рафинација, метал или легура прегрева се изнад температуре ливења (850- 950 °C) ради постизања ситнозрне структуре. Метал и легуре лију се на одређеној температури ливења (650-700 °C). Да се спречи оксидација површине растопљеног метала, запрашује се пре изливања сумпором, а потребно је и лонац за ливење што више приближити уливној чаши да би млаз метала при ливењу био што краћи. Да се спречи запаљење метала при ливењу, обично се у калуп и у течни млаз метала удубава сумпор-диоксид, који ствара редукциону атмосферу. Поред тога, за квалитет одливака у песку или у металним кокилама потребно је да течни млаз метала буде што равномернији. Одливци од легура магнезијума подвргавају се високом жарелу, рекристализационом жарењу и дисперзионом отврдњавању (каљење+старење).

Потпуно жарење изводи се на одливцима ради уједначености крупноће металних зрна, а одвија се на температури 360-420⁰С у току 12-24 сати, са накнадним хлађењем на ваздуху. Рекристализационо жарење изводи се на температури 320⁰С за легуру типа MgMn2, односно 325⁰С за легуру MgAl3ZnMn, у току 5 сати са циљем да се побољша пластичност. У табели 11 су приказани хемијски састави легура магнезијума за ливење.

Табела 9. Хемијски састав легура магнезијума за ливење

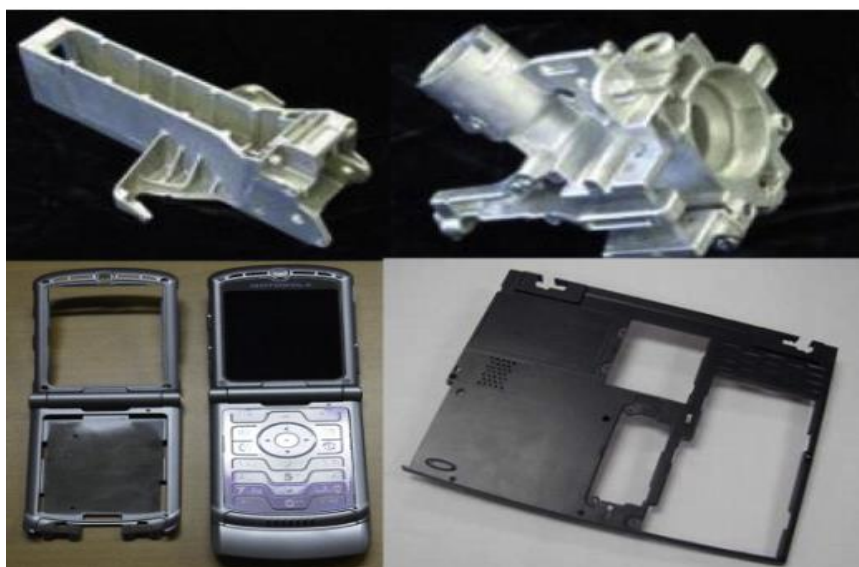
Ознака легури	Хемијски састав у %					Примеса %
	Al	Zn	Zr	Mn	Други	
ML2	-	-	-	1,0-2,0		<0,5
ML3	2,5-3,5	0,5-1,5	-	0,15-0,5		<0,5
ML4	5,0-5,7	2,0-3,0	-	0,15-0,5		<0,5
ML4	5,0-7,0	2,0-3,0	-	0,15-0,5		<0,14
ML5	7,5-9,0	0,2-0,8	-	0,15-0,8		<0,5
ML5	7,5-9,0	0,2-0,8	-	0,15-0,8		<0,14
ML6	9,0-10,2	0,6-1,2	-	0,1-0,5		<0,5
ML7-1	5,0-6,5	0,3-0,7	-	0,3-0,6		<0,45
ML9	-	-	0,2-0,8	-	3,0-3,8 Nd	<0,3
ML10	-	-	0,4-1,0	-		<0,25
ML11	-	0,2-0,7	-	-	2,5-4,0	<0,25
ML12	-	4,0-5,0	0,6-1,1	-		<0,25
ML14	-	1,7-2,3	0,5-1,0	-	2,6-3,8 Th	<0,15

Ливење под високим притиском – Ливење под високим притиском нуди атрактивну флексибилност у производњи компонената од лаких метала. Изврсне карактеристике магнезијумових легура омогућавају економично стварање великих, танких ћелијских зидова и сложених одливака, замењујући челичне конструкције направљене од бројних типова заваривања. Одливци од магнезијума могу се дизајнирати са танким зидовима у деловима где су потребе за чврстоћом веће. Магнезијум се може изливати са тањим зидовима (1-1,5mm), у поређењу са алуминијумом (2-2,5mm). Недостатак крутости магнезијума у односу на алуминијум може се надокнадити одговарајућим помоћним ребрима без повећања дебљине ћелијског зида. У поређењу са алуминијумом, магнезијум има нижу латентну топлоту што доводи до знатно краћих временских циклуса ливења при операцијама ливења. Магнезијум такође нуди и додатне предности у обрадивости у поређењу са алуминијумом. Поступак ливења у врућој комори приказан је на слици 4.11. Код метода ливења у врућој комори, растопљени метал се држи у затвореном челичном лонцу, под заштитном атмосфером. Вентил омогућава контролисан проток растопљеног метала у чауру која је уроњена у растопљени метал. Клип убризгава овај метал. Да би се спречило хлађење метала, млазница се загрева на 400-500⁰С, електричним или индукционим грејањем.



Слика 4.13 Поступак ливења вруће коморе

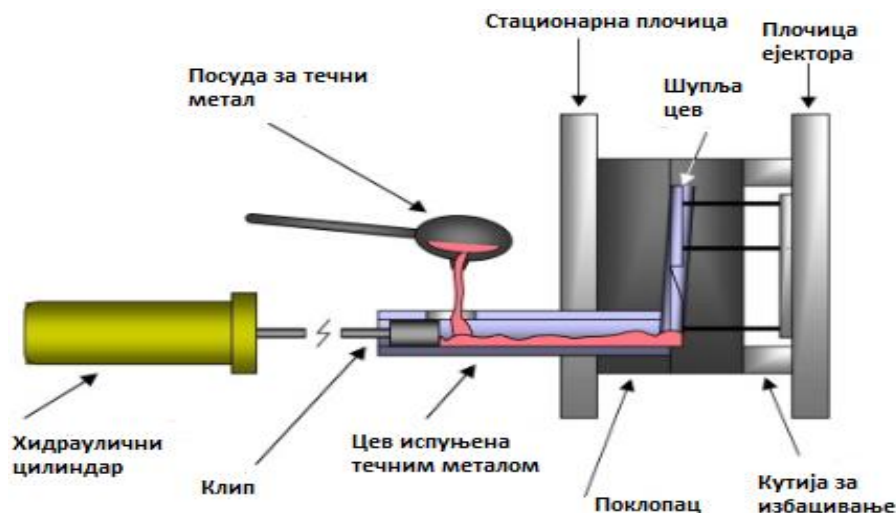
Млазница се често пуни истопљеним металом како би се скратило време циклуса. Ливење у врућим коморама нуди неке различите предности у ливењу магнезијума. Прво и најважније, ограничава контакт растопљеног метала са ваздухом и на тај начин смањује или елиминише стварање оксида. Док не уђе у калупну шупљину, метал се налази у тачки топљења и заштићен је заштитним гасом. Вруће коморно ливење користи предност компатибилности магнезијума и челика. За разлику од растопљеног алуминијума који реагује са челиком, магнезијум је другачији. Због тога је већина посуда за топљење магнезијума обично направљена од угљеничног челика. Када је потребна већа чврстоћа, могу се користити нерђајући челици серије 400. Ови елементи, растворени у магнезијумовим легурама, штетно делују на њихову корозијску отпорност. Притисак на истопљени метал током убризгавања нижи је него код ливења у хладној комори и ограничава величину делова направљених методом вруће коморе. Главни разлог је висока радна температуре разних компоненти, попут млазнице, која ограничава притиске који се могу применити. У типичној машини са врућом комором са праве делове тежине до 2,5 kg. Због кратког времена циклуса (до шест делова у минути), поступак ливења вруће коморе је врло конкурентан за мале делове. Типични машина са врућом комором приказана је на (слика 4.13), и користи се за прављење малих аутомобилских делова (волан, кућиште управљача итд).



Слика 4.14 Делови направљени од магнезијума поступком ливења

Процес ливења у хладној комори приказан је на слици 4.14. Растопљени магнезијум се доводи у цилиндар, аутоматски лопатицама или пумпом. Затим се

убризгава брзо (5-10 m/s) клипом у шупљину где очвршћује у део блока под високим притиском (35-140 МПа). Цео циклус обично траје око један минут.



Слика 4.15 Приказ процеса ливења у хладној комори

Процес ливења у хладној комори нуди низ различитих предности у ливењу магнезијума, неке од њих су:

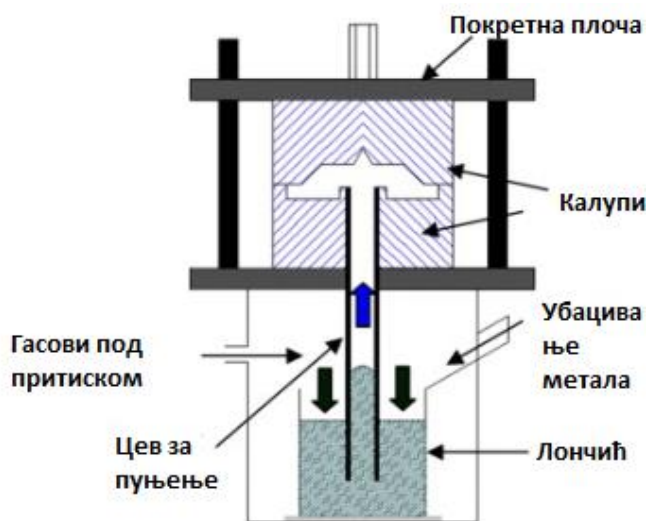
- Процес је веома исплатив у високо конкурентној аутомобилској и електронској индустрији,
- Кратко време циклуса ограничава време контакта растопљеног магнезијума са матрицама, минимизирајући шансу за реакцију са материјалима матрице и ваздухом,
- За разлику од растопљеног алуминијума који тежи интеракцији са челиком, растопљени магнезијум се може задржати и обрађивати са челичним алатима,
- Брзо убризгавање и пуњење растопљеног метала у шупљину калуца омогућава израду великих делова са врло танким пресецима (на пример 1-1,5 mm),
- Брзе стврдњавање (100-500°C у зависности од пресека) резултира врло финим зрнима, посебно у површинама,
- Легуре магнезијума имају нижу специфичну топлоту од легура алуминијума. Као резултат тога, трају најмање двоструко дуже него што се користе за ливење идентичних алуминијумских делова.

Већина аутомобилских ливених легура од магнезијума производи се поступком ливења у хладној комори због горе наведених предности. Типични делови укључују носач инструмент табле, носач хладњака, лежиште мотора, оквир седишта, кућиште мењача, блок мотора, картер итд. На слици 4.19 је приказан једноделни носач инструмент табле направљен од легура магнезијума, коју је 1996. године General Motors увео за свој комби (GMC Savana i Chevrolet Ekspress). Део тежине 12,3 kg номиналне дебљине 4mm, је највеће светско ливење магнезијума, које је обезбедило 32% уштеде масе у односу на примену челика и значајна побољшања перформанси (побољшана радна снага и смањене вибрације). Уштеда трошкова због делова стабилизације (25 делова од магнезијума, наспрот 67 делова од челика). Напредак технологије ливења магнезијума у последњој деценији резултирао је ефикаснијим дизајном у новијим General Motors моделима постижући још веће масовне уштеде (40-45%) и консолидацију делова.



Слика 4.16 Једноделни носач инструмент табле за *Chevrolet Ekspress* (12,3 kg)

Вакуумско ливење – Упркос високој продуктивности, највећи недостатак конвенционалног поступка ливења под високим притиском (магнезијума или алуминијума) је висок ниво порозности услед заробљених гасова који настају због убризгавања растопљеног метала веома великим брзинама током ливења у калупе. Питање порозности је мање битно код пресека танких зидова (мање од 2,5 mm) где механичка својства у великој мери обезбеђују ситнозрнасте и ливене површине без пора. Када су потребни дебљи зидови за крутост у критичним конструкцијским применама, ефекат порозности на механичка својства нарочито дуктилност и замор је озбиљнији. Вакуумско ливење је иновативни поступак где снижени притисак створен у комори за убризгавање и шупљину непосредно пре убризгавања не оставља заробљени ваздух у одливку и омогућава израду релативно великих одливака танког зида са значајно побољшаним својствима. Одливци произведени овим поступком тренутно су намењени за компоненте које захтевају непропусност под притиском и добра механичка својства термичком обрадом. На тај начин вакуумско ливење проширује могућности конвенционалног ливења уз очување његових економских користи.



Слика 4.17 Шематски дијалог машине за ливење под ниским притиском

Ливење под ниским притиском – Ове машина обично укључују лонац под притиском који се налази испод стола за калупљење са потисном цеви (улазна цев) која иде од лонца до дна калупа (слика 4.17). Суви гас користи се за притисак на површину истопљеног метала у лонцу са релативно ниским притиском [19]. Растопљени метал се уздиже кроз доводну цев и доводни систем у шупљину. Када се шупљина калупа напуни, притисак се повећава за наставак пуњења метала у улазне цеви како би се надокнадило скупљање одливака током очвршћавања. Са правилним дизајном система за довод, метал у доводној цеви је и даље истопљен и враћа се у лонац. Укупни циклус се понавља за следећи пут. Будући да је могуће мирно пуњење и дизајн сложених унутрашњих пролаза, очврснути одливак може практично да нема унутрашњу

порозност. Иако је процес повезан са мањим капиталним улагањима у поређењу са HPDC процесом, он не може да произведе зидове дебљине мање од 4 mm за алуминијум или 3 mm за магнезијум, а такође је повезан и са дужим временом циклуса. Око 2-4 пута дужи у поређењу са HPDC-ом у зависности од сложености дела. Међутим, процес може да произведе шупље одливке који се не могу произвести HPDC поступком.



Слика 4.18 *Прототип магнетне контролне ручице коју је произвео General Motors користећи поступак ливења под ниским притиском (LPDC)*

5 Особине магнезијума и његових легура

5.1 Физичка својства

Магнезијум је елемент друге групе треће периоде (атомски број 12). То је земноалкални метал (остали чланови ове групе укључују берилијум, калцијум, стронцијум, баријум, радијум итд). Магнезијум (Mg) је најлакши међу металима.. Лакши је од алуминијума за 35% и преко 4 пута лакши од челика. Магнезијум је сребрнасто бели метал високе електричне проводљивости, ниске густине, релативно јак метал који у додиру са ваздухом ствара танки оксидни слој. Припада групи лакших метала са густином $1,74 \text{ kg/dm}^3$. Магнезијум и његове легуре имају врло добру отпорност на корозију. У обичним условима његова површина је прекривена оксидним филмом, MgO, који се може уклонити загревањем на ваздуху до 600°C . Сагоревање магнезијума након распада оксидног филма започиње одмах са светлуцавим белим пламеном. Нека физичка својства чистог магнезијума дата су у табели 12.

Табела 10. Нека физичка својства чистог магнезијума

Својство	Вредност	Јединица
Температура топљења	648.8	$^\circ\text{C}$
Структурна грађа		
Хексагонална решетка	$a = 0,32028$	nm
	$c = 0,51998$	nm
	$c/a = 1,62$	-
Коефицијент линеарног ширења при 20°C	26,0	10^{-6} 1/K
Проводљивост топлоте при 20°C	1,531	W/mK
Специфична електрична проводност на 20°C	0,00446	$\mu\Omega$
Густина	1,74	Kg/dm^3

Магнезијум је изузетно запаљив метал. Лако се може запалити ако је у облику праха или изрезан у плочице, а много теже се може запалити у облику већег, компактнијег предмета. Једном запаљен, врло тешко се може угасити, а може да гори у атмосфери азота, угљен диоксида, у води итд. Ова особина се користила у запаљивом оружју у Другом светском рату, нарочито у запаљивим авионским бомбама. Једина одбрана од пожара код такве врсте бомбе била је гашење ватре сувим песком, да би се онемогућио доток кисоника. Прах магнезијума се некад користио као извор осветљења у раним данима фотографије. Касније, магнезијумове траке су коришћене за електрично побуђивање сијалице за блицеве. Ова особина магнезијума се манифестује због велике специфичне топлоте магнезијума, по чему је четврти међу металима. [4] Температура пламена магнезијума и његових легура може достићи око 3100°C , али је висина коју достиже пламен изнад горућег метала обично мања од 300mm. Као редукционо средство магнезијум се користи за добијање метала из њихових оксида, као и за катодну заштиту метала од корозије. Магнезијум је добро рангиран као:

- Осми по заступљености елемент у земљиној кори
- Четврти најчешћи елемент у земљи, иза гвожђа, кисеоника и силицијума
- Једанаести по заступљености елемент у маси у људском телу
- Трећи по заступљености елемент растворен у морској води, где су натријум и хлор рангирани на прво, односно друго место

5.2 Механичка својства

Механичка својства чистог магнезијума су врло ниска, а иста се могу присуством легирајућих елемената, као што су цирконијум и алуминијум, мало поправити. Чист магнезијум на сувом ваздуху, до температуре 200°C , поприма танку скраму која га штити од даљег пропадања, али у влажној средини та отпорност нестаје. Ради тога се у нормалним атмосферским условима предмети од магнезијума морају заштитити. Магнезијум је постојан према бензину, керозину и минералним уљима, али истовремено није постојан према воденој пари, као и обичној и морској води. Један од озбиљнијих проблема код магнезијума је стање загрејаности око температуре топљења. Магнезијум је релативно мек и пластичан метал. Његова механичка својства веома зависе од механичке и термичке обраде. Механичка својства ливеног, односно пластично деформисаног магнезијума су: граница течења $24,5$ до 88 N/mm^2 , затезна чврстоћа 113 до 196 N/mm^2 , релативно издужење $8,0\%$ до $11,5\%$, релативно сужење 9% до $12,5\%$, тврдоћа по Бринеллу 294 до 352 N/mm^2 . Као и код других металних производа уопште, затезна и друга својства магнезијумових материјала зависе од састава, стања (било ливеног или кованог), детаља израде, термичке обраде и других фактора. Производи на бази магнезијума доступни су у широком распону механичких својстава. Такође, правац у коме се узима узорак за испитивање утиче на чврстоћу и друга својства. У инжењерском дизајну важнија механичка својства која обично могу бити размотрана су:

1. Издужење,
2. Смичући напон,
3. Чврстоћа на притисак,
4. Тврдоћа,
5. Отпорност на удар.

За неке примене могу бити од значаја својства на различитим температурама. Механичка својства легура магнезијума одређују се у складу са процедурама. У случају легираних магнезијумових легура, притисна чврстоћа је углавном иста као затезна чврстоћа. Међутим, за већину кованих легура магнезијума, чврстоћа је 60 до 70% притисне чврстоће. Затезна и друга механичка својства ливених легура одређују се на засебно изливеним испитним узорцима у складу са стандардним поступком. За малу величину зрна вредности чврстоће пресека дебљине до $12,5\text{mm}$ могу бити 90% минималних вредности. Као што је већ напоменуто, неке легуре се производе у неколико облика, док друге проналазе примену само за једну врсту производње. Механичка својства кованих легура магнезијума одређена су на узорцима одсеченим од стварних производа или ваљаних производа. Узорци се обично секу у смеру паралелном са правцем обраде метала. Такође се могу пресећи попречно или на 45 степени како би се показала унутрашња својства. Механичка својства отковака израђених из дебљих зидова метала у обради такође могу премашити наведене минимуме. Међутим, дебели и тешки отковци направљени од ливених гредица дебљине 150 до 200 mm могу имати својства знатно испод просека. Заправо, својства која се могу добити у одређеном ковању могу се знатно разликовати у варијацијама производне праксе. У случају кованих легура магнезијума механичка својства могу значајно варирати у зависности од степена обраде. Најнижа својства затезања обично се јављају у најмање обрађеним деловима. Дакле, релативно лоша својства могу се појавити у дебелим пресецима и код оних који су изложени најмањој преради. На однос чврстоће на притисак и чврстоће на затезање у магнезијумовим материјалима могу значајно да утичу различити фактори, укључујући састав легура, термичку обраду, стање (било оно ливено или ковано). Истакнуто је да је за легуре магнезијума притисна

чврстоћа приближно иста као и затезна чврстоћа. За коване легуре, међутим, прва може бити знатно нижа. Снага легуре кованог магнезијума обично варира у зависности од смера метала. За магнезијум и његове комерцијалне легуре модул еластичности при истезању је око 45 GPa. У случају легура магнезијума типа М, модул еластичности је нешто нижи од 45 GPa (38GPa). Модул еластичности опада са порастом температуре. Постоје значајни подаци о замору магнезијумових легура. Као што је случај са металима уопште, ови материјали су осетљиви на сечење и друге врсте обраде који имају ефекат да значајно смање своје границе издржљивости. Механичка својства магнезијума су ниска и у многоме зависе од стања испоруке, што оријентације ради, је дато у табели 13.

Табела 11. Механичка својства магнезијума

Стање	R _{p0,2}	R _m	A ₁₀	Z	R _D	HBS
	MPa		%		MPa	
Ливено у песку	-	100	5			35
Ливено у кокили	-	130	7			40
Шипке добијене истискивањем	90	200	11,5	12,5		40
Лим- жарен	95	190	16		63	40
Лим-хладно ваљан	190	260	9,0			50

5.3 Отпорност на корозију

Корозија се може дефинисати као разарање материјала које настаје сложеним физичко-хемијским дејством околне средине. Корозија представља обрнути процес од поступка добијања метала и она предстаља природну појаву повратка метала у почетно равнотежно стање, при чему систем смањује слободну енергију. Највеће штете изазива атмосферска корозија која напада машинске и грађевинске конструкције у загађеној атмосфери нарочито у индустријским зонама, градским срединама, у рудницима, морским обалама и другим срединама са повећаном влажношћу.

Легуре магнезијума (Mg), представљају лаке конструкционе материјале за тренутне, нове и иновативне примене. Имају висок однос чврстоће и масе, али лоша отпорност на корозију утиче на одрживост повећане употребе магнезијума. Излагање влажном ваздуху са 65% релативне влажности током 4 дана даје дебљину корозионог слоја од 100–150 nm. Филм је аморфан и има брзину оксидације мању од 0,01 $\mu\text{m}/\text{god}$. Вредности рН између 8,5 и 11,5 одговарају релативно заштитном оксидном или хидроксидном филму, међутим изнад 11,5 примећен је пасивни стабилни слој. Лоша отпорност на корозију многих легура Mg може бити последица унутрашње галванске корозије изазване другим фазама или нечистоћама. Мешање или било који други начин уништавања или спречавања стварања заштитног филма доводи до повећања кинетике корозије. Промене рН вредности током корозије могу произићи из две различите реакције редукције: редукције раствореног кисеоника (O) и јона водоника (H). Филиформна корозија која настаје на материјалима на којима превлака не пријања јако на подлогу примећена је на легури AZ31. Напонска корозија се вероватно може покренути због реакције хидролизе. Пилинг се може сматрати врстом интергрануларног напада и то се примећује код нелегираног Mg изнад критичне концентрације хлорида. Дакле, у влажном ваздуху, магнезијум и његове легуре увек формирају танак површински филм. Овај природни површински спољашњи слој није густ што указује да основни метал не може бити потпуно покривен. Као резултат тога, магнезијум и његове легуре су изузетно подложне корозији. У прошлости, корозија је била

преовлађајући фактор како би спречила обављање функције легуре магнезијума. И ако смањење критичних садржаја Fe, Cu и тако даље утичу на промену легуре магнезијума, ипак је недостајао слој за ефикасну регенерацију. У оба случаја легирања и производње, напори треба да буду усмерени на састав и њене одговарајуће микроструктуре, укључујући зрна, термичку обраду и тако даље.

Постоје два начина за заштиту магнезијума и његових легура на корозију:

- Минимизирати потенцијалну разлику између магнезијум/легура - магнезијума и различитих материјала,
- Максимизирати отпор електричног кола.

Легуре магнезијума које садрже Al сматрају се највише подложним у разним условима. Стога, легуре магнезијума попут AZ61, AZ80 и AZ91 са 6, 8 и 9% алуминијума, респективно, показују већу осетљивост, док AZ31, са 3% алуминијума легура, сматра се да показују добру отпорност. Цирконијум и ретки земљани елементи сматрају се само благо осетљивим, а легуре магнезијума су највише отпорне као ZK60, ZE41, као и легура магнезијума са манганом. То је од велике важности јер спречава корозиони замор легура магнезијума. Штавише, замор легуре магнезијума у корозивним растворима попут NaCl, CaCO₂ је увек мањи него у ваздуху. Да би се ефикасно заштитиле легуре магнезијума од корозије, погодно је користити адекватне превлаке. Најефикаснији начин спречавања корозије је наношење превлаке на основни материјал. Превлака штити основни материјал формирајући баријеру између основног материјала и околине или употребом корозионих инхибитора. Да би превлака пружила адекватну заштиту, мора да буде компактна, непорозна, да добро приања и да има могућност регенерисања на местима на којима може доћи до њеног оштећења. Један од проблема са магнезијумом је његова реактивност. У контакту са ваздухом или водом, долази до формирања оксидног или хидроксидног слоја на површини метала који штетно утиче на приањање превлаке и компактност. Процес припреме метала пре наношења превлаке игра битну улогу за добијање добре превлаке на магнезијуму. Технологије за наношење превлака су многобројне и свака има своје предности и мане. Такође се и методе за припрему површине разликују у зависности од врсте материјала [23]. Легуре магнезијума које су отпорне на корозију су:

1. Легура магнезијума типа LM5,
2. Легура система Mg-Al-Zn,
3. Легура система Mg-Zr,
4. Легура система Mg-Mn.

6. Примена магнезијума и његових легура

6.1 Употреба у аутомобилској индустрији

Због ниске густине, доброг одвођења топлоте, доброг пригушивања и доброг електромагнетног штита, легуре магнезијума имају широке и растуће апликације због њихове најлакше структуре металних материјала. Годинама, аутомобилски произвођачи су проучавали однос масе возила и економичности горива, како би се испунили захтеви за више економског коришћења горива у нижим емисијама у време раста утицаја на животну средину. Као занимљива иновација, делови аутомобила, као што су: коленасто вратило, брегасти вратило, мењач, већина поклопаца и делови електричног генератора замењени су магнезијумом и његовим легурама. Време које је потребно да аутомобиле пређе пут од нацртаних идеја до готовог производа спремног за вожњу, најкраће је у историји аутомобилизма, и износи само 2,5 године. Људи су све чешће принуђени да купују нове аутомобиле, те се посебна пажња мора посветити приликом конструисања истих. Захтевано је да возила буду лакша за управљање, енергетски ефикаснија и сигурнија, што се једино може испуниити добрим инжењерингом од самог старта користећи нове материјале како би се маса довела на прихватљив ниво. Веома мали број људи запита се какав утицај има маса њиховог аутомобиле на, како возне карактеристике, тако и на безбедност, потрошњу горива, емисију угљен-диоксида (CO_2) који је у данашње време један од највећих проблема са којима се човек суочава. Сви смо донекле упознати са подацима о превеликој концентрацији CO_2 у атмосфери, ефекту стаклене баште, стварању озонских рупа, топљењу поларних капа и глобалном повећању нивоа мора, али мали број људи је свестан колико разлика у маси од 100kg може допринети ублажавању тих појава, као и ефикаснијем коришћењу возила са далеко мањим зауставним трагом, енергетски ефикаснијом потрошњом и повећаном безбедношћу, који се директно одражавају на финасијски аспект, и много важније, на сигурнију, безбеднију вожњу и одрживи развој. Данашња возила имају велику масу јер су у великом броју случајева сатављена од материјала који се показао веома чврстим, али велике масе. Данас постоји велики број алтернативних материјала, чије добијање је скупље, међутим постоји свесност за неопходношћу смањења масе возила, па се зато улажу велике количине новца у нова истраживања и даља усавршавања алтернативних материјала. Протеклих 25 година уложен је огроман труд, велики број радних сати и финасијских средстава у усавршавање примене магнезијума као замену за досад најкоришћенији материјал у аутоиндустрији, челик. Други метални материјали налазе се као алтернативни у почетним фазама испитивања и усавршавања па је њихова употреба ограничена на одређене функције и локације на возилу, али се у наредним годинама очекује велики напредак, како у усавршавању постојећих, тако и у избору потпуно нових материјала, легура и начина дизајнирања аутомобила. Правилно дизајнирање је један од круцијалних фактора за производњу аутомобила који задовољавају данашњи све више стандард, које поред купаца, еколога, агенција за безбедност у саобраћају, дефинише и светска ситуација ограничених резерви фосилних горива и могућност дефицита истих. Алтернативни дизајн, материјали и избор погонског горива, представљају саму основу будућих возила, који ће се на многим пољима битно разликовати од садашњих. Магнезијум је елемент веома битан за прављење делова како у авио, тако и у ауто индустрији. Његова мала густина, одлична проводљивост струје и топлоте, добар електромагнетни штит, само су неке од карактеристика који га чине веома прихватљивим. Обзиром да представља само 1/4 масе коју има челик, сваки килограм

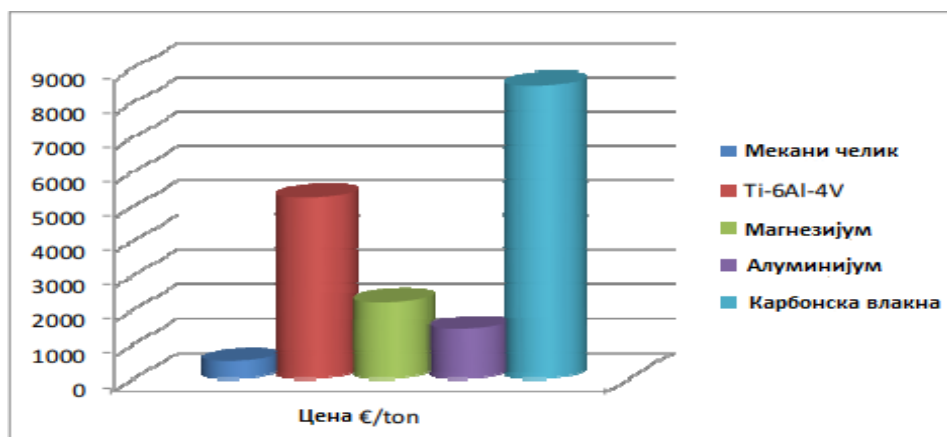
употребљеног магнезијума је битан, јер он значи да 3 kg мање масе неког дела, или система. Веома лако се обликује, мале масе и солидне чврстине, али лако запаљиве, па се у аутомобилима користи на одређеним местима. Летва управљача, сам управљач, унутрашњи оквир петих врата и задњих врата, конструкција седишта, усисне гране, поклопац главе мотора и од битнијих уштеда, кућишта мењача (слика 6.1). Користи се јер има еластичну структуру и помаже при апсорбовању сила приликом удеса. Густина износи максималних 1.800 kg/m^3 , док је затезна чврстоћа 275-375 МПа, која је приближна вредности коју има алуминијум, али 30% лакша. У односу на челик, маса магнезијума представља само 25% масе челика, па би у теорији, 100 kg употребљивог магнезијума на ауту, требало да замени чак 400 kg челика, уз уштеде од невероватних 300 kg. Проблем представља немогућност широке употребе магнезијума код аутомобила, па су велика смањења масе тренутно немогућа. Међутим, периодично се наилази на аутомобиле са укупном масом уграђеног магнезијума са око 20 kg, што представља директно смањење масе од 60 kg, што доприноси и бољој моторној ефикасности и смањењу емисије штетних гасова. Употребном магнезијумских фелни, може се уштедети до 20-30 kg у зависности од величине фелни, затим магнезијумских мењачких кутија чак и до 50 kg. Постоји и велики број делова на аутомобилима на којима се могу обезбедити незнатна смањења масе, док се исто тако велики део употребе магнезијума заснива на његовим другим физичким карактеристикама попут флексибилности, електро и термо проводљивости.



Слика 6.1 Делови аутомобила направљени од магнезијума

Као и сваки други елемент, и магнезијум има својих лоших страна. Неки од битнијих су: веома велика запаљивост, тачка паљења налази се на око 600°C , док велика реактивност магнезијума у његовим легурама доприноси и веома великој тенденцији ка корозији. Чист магнезијум остављен на собној температури ухватиће кородивни слој у свега пар секунди. Неке од лошијих карактеристика могу се смањити, али веома тешко и потпуно уклонити. За то се користе различити заштитни слојеви и фарбе, како би на што бољи начин заштитили површину легуре. Већина ових премаза садржи канцерогене елементе, као и сам цијанид. Још један од проблема је и рециклажа

магнезијумских легура, која представља прилично компликованији процес од нпр рециклаже алуминијума, и мора се одиграти у контролисаним условима, што је увек скупље. Производња магнезијума и његових легура није толико скупа, напротив, она је и више него дупло мања од производње титанијумских легура, али скупља од челика и алуминијума. Међутим, када је у питању производња аутомобила, од магнезијума се доста очекује у будућности, пре свега због своје јако мале густине. Технологија напредује убрзано, процеси се мењају, све добре карактеристике се побољшавају а лоше уклањају, па је веома реална слика да се у будућности велики број компоненти унутрашњости наших возила буде направљен управо од веома лаких, али и издржљивих легура метала магнезијума. Производња истих налази се на месту где се производња челика налазила пре 25 година, тако да се реално може очекивати повећање конкурентности ових легура у скоријој будућности. Најпознатије легуре у аутомобилској индустрији су AZ91, AM50, AM60 и R35, док је најшире коришћена легура AZ31, која се највећим делом користи у авионској индустрији, поготово у војним хеликоптерима и авионима. Све легуре магнезијума, додатно се премазују заштитним фарбама и заштитним слојевима, како би осигурали дугогодишњи рад без корозије. Цена добијања ових легура јесте већа од добијања челика и легура алуминијума, али ће се у будућности, својим фантастичним односом масе и јачине, то и оправдати. Као и свуда, процеси се мењају, сазревају, па тако и производња магнезијума и његових легура временом ће захтевати мањи број операција и мање температуре, па ће самим тим цена њихове производње бити мања. На тај начин магнезијум ће постати озбиљнији и конкурентнији противник челику (слика 6.2). Гигант који тренутно контролише 95% светске производње је Кина, која има веома јефтину радну снагу и јако добру технологију, тако да је појефтињење производње легура и повећање њихове тражње неминовно. Велики број светских научника и физичара заправо фаворизује употребу магнезијума, и сматра се да ће иновативне аутомобилске компаније попут Wolksvagen-а или BMW-а, гледано дугорочније, на период од барем 10 година, повећати употребу магнезијума са до сада максималних 25 kg на просечних 150 kg. Овај податак је интересантан, јер би само заменом одређених делова и употребом легура магнезијума у овој количини, могло допринети масивној уштеди у маси од чак 450 kg, док карактеристике новоуграђених делова могу бити само боље у односу на претходне. Наравно, постоји велики број легура магнезијума које су још увек у тест фазама, јер комбинација је практично небројано много, само би требало добити легуре које су превасходно јефтиније за производњу, а затим боље, издржљивије и отпорније од досада познатих. Дакле, магнезијум и његове легуре, временом ће засигурно постајати све конкурентније. [24]



Слика 6.2 Цене материјала на европском тржишту

6.2 Биомедицинска употреба

Биокомпатибилни материјали су они материјали који се примењују у контакту са ћелијама, ткивима или телесним течностима људског организма. Најчешће се користе за замену или надоградњу структурних компоненти људског организма како би се надоместила оштећења до којих долази због старења, болести или несрећних случајева. Материјали који се користе за израду медицинских имплантата морају да задовоље одређене критеријуме и имају следећа својства 1 : – биокомпатибилност – материјали који се имплантирају у живи организам морају се одликовати изразитом биокомпатибилношћу, односно, изразитим афинитетом ћелија према површини имплантата. Постоји велики број материјала који су, са чисто инжењерског аспекта, идеални за израду имплантата. Међутим, уколико ткиво не може да прихвати „страно тело“, онда је оно, ма колико да су његови квалитети супериорни са инжењерског аспекта, неприхватљиво за израду имплантата; – нетоксичност – ово је изузетно важна карактеристика биомедицинских материјала с обзиром на то да ослобађање металних јона и других продуката може утицати на појаву канцера, деформитета, алергија, некроза, калцификација; – отпорност према корозији – у идеалном случају биокомпатибилни метални материјали не би требало уопште да кородирају када се налазе у додиру са живим ткивима; – издржљивост – материјали усађени у људски организам у виду имплантата током целог свог радног века требало би да функционишу без икаквих оштећења, што подразумева њихову високу заморну чврстоћу при корозији и заморну чврстоћу при трењу и корозији, али и минимално ослобађање честица приликом појаве трења и хабања; – чврстоћу и жилавост – димензије имплантата ограничене су и морају тежити што мањим вредностима због ограниченог простора у људском организму, а вредности чврстоће и жилавости морају бити довољно високе; – ниске вредности модула еластичности – Јангови модули биокомпатибилних материјала, који се данас користе у ортопедској хирургији, пет до десет пута виши су од Јанговог модула кости, што је изузетно неповољна карактеристика ових материјала с обзиром на то да разлика модула еластичности металног материјала и кости, који се налазе у контакту, условљава значајно оптерећење кости и као резултат има смањење густине костију. Импантати имају компликовану конфигурацију и израђују се од легура погодних за прецизно ливење у вакууму, ковање и хладно деформисање уз неопходну завршну механичку обраду, са циљем да се повећа отпорност имплантата на лом услед замора материјала.

На пример у поређењу са полимерима, магнезијум јони су потребни у људском телу за физиолошке функције, а потрошња лежи у опсегу 250-500g дневно. Око 20g магнезијума је увек присутан у просечном људском телу (тежине 70kg). Токсична доза је непозната. Импантати су у незаобилазни део медицине, од зуба до вештачких кукова. Често се ради о материјалима који нису трајни па истраживачи раде на развоју имплантата који би се после одређеног времена сами растворили.

Сломљене кости се данас врате на своје место, фиксирају и оставе тако док кост не зарасте. Ломове хирурзи често фиксирају и плочицама од нерђајућег челика или титанијума. Међутим велики проблем је што се страном телом мора уклонити када једном кости срасту. Пацијент се мора поново подвргнути операцији, а такви захвати увек подразумевају и одрђени ризик. Са импантатима од магнезијума то се може избећи јер се они сами разграђују у организму. Ипак, ни употреба магнезијума није без компликација. У овом случају не може се контролисати колико ће трајати импантат пре него се потпуно раствори. Он се потом складишти у костима и мишићима или потпуно излучује. Импантати од магнезијума се не растварају толико брзо и лако као чисти магнезијум. Дакле, кости имају више времена да срасту. У тој форми, магнезијум је обећавајући материјал за импантате приликом ломова костију. У експериментима са животињама, ишчекивања су не само испуњена него и премашена. Студије које следе

требало би да утврде колико добро пацијенти подносе имплантате. Покажу ли клиничке студије позитивне карактеристике легура магнезијума, оне би могле ускоро заменити челичне и титанијумске имплантате (слика 6.3).



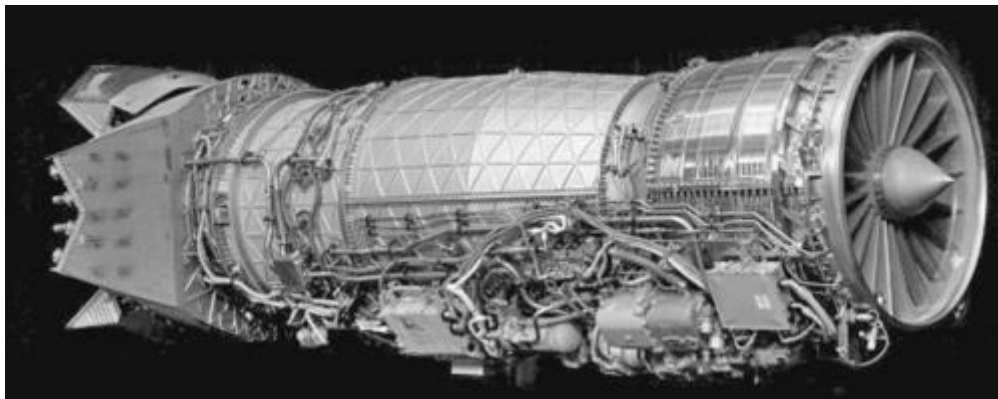
Слика 6.3 Магнезијумски имплантати који сами нестају

6.3 Употреба у авио и ракетној индустрији

Авиони се већином израђују од метала, углавном алуминијума, магнезијума и њихових легура. Магнезијум и његове легуре, за разлику од композита изузетно су неотпорне на појаву корозије и микро пукотина у структури које настаје због поновљеног цикличног оптерећења. Ово оптерећење се јавља услед сталних промена притиска, што је опасно и уколико се благовремено не открије може изазвати катастрофу. Иако је смањење тежине авиона основна ствар, употреба легура магнезијума није широко распрострањена у авионима због „традиционалних“ проблема са отпорношћу на корозију. Иако постоје нове легуре магнезијума са побољшаном отпорношћу на корозију, те легуре су углавном дизајниране за аутомобилску индустрију. Легуре за авио и ракетну индустрију морају да комбинују високе перформансе у погледу механичких својстава и отпорности на корозију. Данас је недостатак довољног броја легура које би задовољиле потребе савремене ваздухопловне индустрије. [27] Примери легура које се највише користе у авио и ракетној индустрији:

1. Легура типа $MgMn_2$ примењује се за слабо оптерећене делове конструкција авиона. Обрађује се како на топло ($260-450^{\circ}C$), тако и на хладно. Отпорна је према корозији и добро се заварује.

2. Легура типа $MgAl_3ZnMn$ користи се за отковке у калупима са сложенom кофигурацијом за слабо оптерећене делове конструкција авиона, као и у градњи машина. Може се обрађивати на топло ($230-420^{\circ}C$) и на хладно. Заварљива је.
3. Легура типа $MgAl_6Zn_3Mn$ примењује се за оптерећене делове конструкције авиона и на железници. Може се обрађивати само на топло ($320-350^{\circ}C$). Добро се обрађује скидањем струготине и заварљива је. (слика 6.4)



Слика 6.4 Помоћно кућиште авионског мотора

Историјски гледано, магнезијум је био један од главних аерокосмичких грађевинских метала, и коришћен је за немачке војне авионе већ у Првом светском рату, а обилно за немачке авионе у Другом светском рату. (слика 6.4) Ваздухопловне снаге Сједињених Држава Бомбардери В-36 и В-52 великог домета такође су садржавали велику количину магнезијумовог лима, одливака, отковака. Авиони Боинг 727, израђени од 1962. до 1984. године, садржали су 1200 магнезијумових делова укључујући управљачке површине, актуаторе, оквири врата, точкови, мењачи мотора, делови за производњу електричне енергије, структурни елементи (који нису примарни) и други. Интензивно се користио и магнезијум у бившој совјетској авионској индустрији: на пример, авион TU-95МС имао је 1550 kg магнезијума, а TU-134 је имао 780 kg магнезијумових компонената на различитим локацијама авиона. Нажалост, многе од ових апликација нестају у савременом ваздухопловству, због уочених опасности од делова магнезијума у случају пожара, као и Међународног удружења ваздушног транспорта (IATA) законодавства које ограничава легуре магнезијума на неструктурне делове због проблема с корозијом пријављених током 1950-их и 1960-их.



Слика 6.5 Авиони у којима су примењивани делови од магнезијума

6.4 Употреба магнезијума у другим областима

Магнезијум у облику чистог метала не употребљава се као конструкциони материјал због лоших механичких својстава, нарочито затезне чврстоће, која за магнезијум (99,5% Mg) ливен у калупима износи око $100\text{--}120\text{ N/mm}^2$. Као конструкциони материјал магнезијум се употребљава у облику својих многобројних легура, којима је, захваљујући ниској густини (специфичној тежини) магнезијума, специфична чврстоћа (чврстоћа по јединици тежине) једнака или већа од чврстоће специјалних челика. Метални магнезијум има широку примену у металургији, како у црној тако и у обојеној. Употребљава се као легирајући елемент у легурама цинка, олова и других обојених метала. Служи као дезоксиданс при производњи легура бакра и никла. Захваљујући веома израженим редукционим својствима магнезијум се много примењује као редукционо средство при добијању низа ретких и тешко топивих метала као што су уран, цирконијум, титан, хафнијум, берилијум, ванадијум и други. У ливницама сивог лива магнезијум се употребљава за производњу нодуларног лива. Додатак магнезијума сивом ливу при изливању проузрокује издвајање графита у облику нодула. Способност магнезијума и његових легура да при сагоревању развијају интензивно осветљење и високу температуру искоришћена је у ратној техници. У пиротехници магнезијум се употребљава у облику металног праха или праха легура (нпр. легура са алуминијумом). У смеши са оксидансима служи за производњу светлећих и сигналних ракета, запаљивих (пиротехничких) ракета, запаљивих граната и авионских бомби. Магнезијум служи и за осветљење у фотографској и филмској техници. Магнезијум и специјалне магнезијумове легуре, захваљујући високој електронегативности магнезијума, служе за катодну заштиту челика, бакра и бакарних легура од корозије. За те сврхе (као аноде) употребљава се или веома чист магнезијум (99,8% Mg) или магнезијумове легуре са алуминијумом, цинком и манганом, који повећавају ефикасност анода. Суве батерије система манган-диоксид-магнезијум служе као извор енергије комуникационих уређаја ратне технике. У тим батеријама легуре магнезијума са алуминијумом, цинком, манганом и калцијумом употребљавају се као аноде у алкалном електролиту. Магнезијум служи и за производњу батерија за ракетне системе које се активирају непосредно пре употребе наливањем воде (нпр. морске). У нуклеарној техници специјалне легуре на бази магнезијума много се употребљавају као материјал за облагање горивних уранових елемената у гасом хлађеним нуклеарним реакторима. Магнезијум поред велике примене коју налази у аутомобилској, авио, ракетној индустрији, као и наравно у медицини, примену такође налази и у архитектури, грађевинарству, бродоградњи и тако даље. Магнезијум хлорид је свестрани минерал који се користи као део цементне смеше и улива у танке цементне плоче у складу са правилним поступцима и праксама очввршћавања. Може користити у изградњи стамбених и пословних зграда. Неке верзије су погодне за широк спектар општих грађевинских намена и за апликације које захтевају отпорност на пожар и тако даље, као и апликације за контролу звука. Као еколошки прихватљив грађевински материјал, магнезијумска плоча има отпорност због врло јаких веза између атома магнезијума и кисеоника који формирају молекуле магнезијум. Магнезијумске плоче користе се уместо традиционалних гипсаних табли као материјал за облагање зидова и плафона. Користи се у бројним другим грађевинским применама као што су фасаде, и одвајање простора, облагање зидова и као подлога за плочице или као подлоге за премазе и изоловане системе. Тренутно се у Азији широко користе различите магнезијумске цементне плоче као примарни грађевински материјал. Неке верзије означене су као службени грађевински материјал Летњих олимпијских игара 2008. године. Магнезијумски цемент се производи у многим областима широм света, углавном у близини подручја у којима се ископавају налазишта руда на бази

магнезијума. Главна налазишта налазе се у Кини, Европи и Канади. Неке од предности су:

- Отпоран на ватру,
- Водоотпоран,
- Отпоран на ударце,
- Не садржи у себи азбест,
- Може се користити на местима традиционалних гипсаних плоча или цементних плоча,
- Тврда повшина која не упија, нема у себи папир,
- Може се користити у применама које се заснивају на бази цемента.

Плоча од магнезијум оксида, MgO плоча, је фабрички произведен неизолациони картон. Може се користити за бројне примене, укључујући зидне и плафонске облоге, фасаде, подлогу за плочице и друге врсте подлога. Направљен је од магнезијумовог оксида, врсте минералног цемента, а обично га зовемо MgO. MgO је доступан у више облика, а за изградњу грађевина долази у различитим дебљинама и величинама лима. Постоје десетине компаније које производе MgO плоче, а већина њих се налази у Азији. Постоји неколико великих произвођача, али већина су мали локални произвођачи који опслужују регион. До сада се много MgO користи на територији САД, али без сумње ће се у будућности много више користити. Чист магнезијум у сировом облику није стабилан – сагорева. Кисеоник када се комбинује са магнезијумом, под притиском, може да добије материјал сличан камену. MgO постоји у лежиштима као сирова стена и минира се попут осталих минерала. Уситњава се у прах који се затим комбинује са водом да би се остварио цементни (лепљиви) материјал. Око 70 процената светског MgO налази се као што је већ наведено у Азији. Остала налазишта налазе се на другим местима широм света, али немају све одговарајуће квалитете за израду облога. Има довољно MgO-а који се може раширити широм света да би вековима био довољан. MgO плоча садржи и друге компоненте на бази магнезијума, али је главна компонента баш MgO. [28] Од магнезијума и његових легура, које се веома добро пластично обрађују израђује се низ полуфабриката облика шипки, жица, профила, лимова, трака, цеви и отковака. Према технологији израде полуфабриката од магнезијума и његових легура они могу бити израђени путем пресовања, односно хладног вучења или топлог и хладног ваљања, зависно од жеља за тачношћу димензија. Површина полуфабриката мора бити глатка, чиста и без површинских грешака као што су пукотине, љуспе, мехурићи, неравнине, набори, бразде и други недостаци. Дозвољене су мање површинске грешке које се обрадом у оквиру дозвољених одступања, могу одстранити.

Од магнезијума, због своје мале густине, и његових легура праве се многи комерцијални делови и уређаји који су данас у широкој употреби. Као карактеристични примери могу се навести књишта телефона, фотоапарата и лаптоп рачунара, рамови бицикла, оквири наочара, делови кућишта моторних тестера, тримера, оквири звучника, спортских реквизита итд. (слика 6.6).



Слика 6.6 Карактеристични примери комерцијалне примене легура магнезијума

7. Закључак

Од свих инжењерских алата, магнезијум је најлакши. У чистом стању у индустрији има ограничену примену због рђавих механичких особина. Зато се углавном користе легуре Mg са Al као главним ојачавајућим елементом на бази растворног жарења и термичког старења. Додатком цинка (Zn) повећава се пластичност, а додатком мангана (Mn) корозиона отпорност у спољној атмосфери и хидроксидима. Легуре магнезијума се деле на легуре за ливење и легуре намењене пластичној преради. И једне и друге се употребљавају у авионској и аутомобилској индустрији мотора. Најпознатија је ливачка легура Al-Zn која носи назив електрон. Ова и друге легуре магнезијума служе за израду лаких поклопаца, кућишта и картера мотора, кућишта пумпи за гориво, облога задњег моста моторних возила итд. Легуре магнезијума најбоље се заварују у заштити аргона, а могу се лепити помоћу специјалних лепкова. Магнезијум је метал будућности. Магнезијум је лакши за 33% од алуминијума, за 60% од титана и за 75% од челика. Упркос чињеници да га је лако пронаћи, магнезијум се никада не налази чист у природи. Као резултат тога, развијено је много различитих метода за раздвајање магнезијума из других супстанци. Магнезијум би се могао описати као широко распрострањен у природи где се веже са другим елементима. Другим речима, не живи изоловано. Добри примери су $MgCl_2$ и MgO . Због своје јаке реактивности, не јавља се у свом чистом стању, већ се налази у широком спектру једињења у морској води и стенама. Његова реактивност је разлог зашто овај врло широко распрострањен елемент није произведен као метал раније у цивилизованој историји. Многа истраживања о процесима магнезијума се изводе у многим земљама подручја широм света. Истраживање ефикаснијих метода граничи се са врло великим пробојем до врло ефикасног и нижег трошка процеса.

8. Литература

- [1]. https://www.researchgate.net/profile/Samra_Muratovic/publication/285740105_Znacaj_el_emenata_sp_i_d_bloka_u_zivim_organizmima/links/5662f81f08ae192bbf8edef6.pdf#page=5 приступљено 04.05.2019.
- [2]. <https://magnezijumkalcijum.wordpress.com/2014/05/16/%D0%B1%D0%B8%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D1%88%D0%BA%D0%B8-%D0%B7%D0%BD%D0%B0%D1%87%D0%B0%D1%98-%D0%BC%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%B5%D0%B7%D0%B8%D1%98%D1%83%D0%BC%D0%B0-%D0%BA%D0%BE%D0%B4-%D1%87%D0%BE%D0%B2%D0%B5-2/> приступљено 04.05.2019.
- [3]. <https://sr.wikipedia.org/sr-ec/%D0%9C%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%B5%D0%B7%D0%B8%D1%98%D1%83%D0%BC#%D0%98%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%98%D0%B0> приступљено 04.05.2019.
- [4]. <https://www.britannica.com/biography/Joseph-Black> приступљено 05.05.2019.
- [5]. <https://studenti.rs/skripte/hemija/magnezijum-i-njegova-jedinjenja/> приступљено 05.05.2019.
- [6]. <https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/magnezij.pdf> приступљено 11.05.2019.
- [7]. <https://www.docsity.com/sr/minerali-i-rude-skripta-petrografija-sumarstvo/304446/> приступљено 12.05.2019.
- [8]. Eliezer D. E Aghion i FH Froes, (1998), *Magnezijum u nauci i tehnologiji*, 5. izdanje, стр: 201-212.
- [9]. Garmo, EPD, JT Black i RA Kohser, (1997), *Magnezijum i legure magnezijuma*, Materijali i procesi u proizvodnji, 8. Izdanje, стр: 182-184
- [10]. <http://scindeks-clanci.ceon.rs/data/pdf/1450-7188/2002/1450-71880233109B.pdf> приступљено 28.05.2019.
- [11]. Đukic V.(1994) *Mašinski materijali*, Naučna knjiga, Beograd.
- [12]. Djordjevic V. (1999), *Mašinski materijali- prvi deo*, Mašinski fakultet Beograd.
- [13]. Dr Sebastian Baloš, Prof. Dr Lepasava Šidanin, Mr Dragan Rajnović, Dipl. hem. Vesna Vučić (2008) *Zavarivanje raznorodnih magnezijum legura primenom različitih postupaka*, Fakultet tehničkih nauka, Departman za proizvodno mašinstvo, Нови Сад.
- [14]. https://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id_clanak_jezik=139584 приступљено 03.06.2019.
- [15]. <http://nardus.mpn.gov.rs/handle/123456789/5758> приступљено 04.06.2019.
- [16]. <https://zir.nsk.hr/islandora/object/unin%3A829> приступљено 07.06.2019.
- [17]. Željko Santoši, (2014) *Zavarivanje trenjem sa mešanjem*, Univerzitet Novi Sad, Fakultet Tehničkih Nauka, Novi Sad.
- [18]. <https://www.scribd.com/doc/46688289/Projektovanje-Tehnologije-Livenja-Predavanja> Приступљено 15.06.2019.
- [19]. <http://nardus.mpn.gov.rs/handle/123456789/4815> приступљено 18.06.2019.
- [20]. E. Ma and J. Xu. (2006), “*Biodegradable alloys: the glass window of opportunities*,” Nature Materials, vol. 8, no. 11, стр: 855–857
- [21]. M. Jovanović, D. Adamović i dr.(2003), *Mašinski materijali*, Kragujevac.
- [22]. N.E. Fridrih, BL Mordike. (2006), *Magnesium technology Metallurgy, Data design. Applications*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [23]. <http://www.paluba.info/smf/index.php?topic=9767.0;wap2> приступљено 02.07.2019.
- [24]. Mustafa KK. (2008), *Magnezijum i njegove legure primena u automobilskoj industriji*, International Journal of advanced production technology, стр: 851-863.

- [25]. <http://www.apotekasrbotrade.rs/srpski/proizvod/magnezijum-sumece-tablete> приступљено 10.07.2019.
- [26]. [https://nastavnimaterijalvtsz.files.wordpress.com/2018/12/predavanje - kompozitni materijali.pdf](https://nastavnimaterijalvtsz.files.wordpress.com/2018/12/predavanje_-_kompozitni_materijali.pdf) приступљено 03.08.2019.
- [27]. J. E. Gray, B. Luan, Legure Mg i kompoziti, 2002, p. 88–113
- [28]. <http://ba.stargrace-mgo.com/info/what-s-mgo-board-39458127.html> приступљено 12.08.2019
- [29] prof. Dr Vladislav Đukić (1998.) *Magnezijum i njegove legure*; Књига у рукопису, Универзитет у Крагујевцу, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу.