

DISPOZITIVE DE PRINDERE MAGNETICE: REALIZĂRI RECENTE ȘI TENDINȚE

MAGNETIC WORKHOLDINGS: RECENT ADVANCES AND TRENDS

Tudor PĂUNESCU

Transilvania University of Brasov, Romania

Rezumat. În ultimii zece ani aplicabilitatea dispozitivelor de prindere magnetice s-a extins datorită inovațiilor în domeniul magneților permanenți-electromagneți și a celor permanenți. În prezentul articol se încearcă o sistematizare și o analiză a realizărilor recente din domeniul dispozitivelor magnetice și în special a celor cu magneți permanenți-electromagneți.

Cuvinte cheie: dispozitiv de prindere magnetice, magnet permanent-electromagnet, analiză dispozitive

1. Introducere

Noile mașini-unelte cu conducere numerică având 3+2 și 5 axe permit accesul din cinci direcții la piesele instalate pe palete, asigură o precizie de poziționare ridicată și facilitează creșterea productivității. Acestea sunt soluția optimă pentru prelucrarea pieselor cu geometrie complexă.

Mașinile-unelte cu cinci axe devin din ce în ce mai populare și producătorii de dispozitive de prindere au dezvoltat sisteme speciale care să rezolve problemele particulare ale prinderii pieselor. Astfel principalele obiective ale acestor dispozitive sunt: să ridice piesa deasupra suprafeței de așezare, să o poziționeze și orienteze optim în vederea operațiilor de așchiere și să o fixeze sigur [1].

Noile inovații ca blocurile din magneți permanenți-electromagneți și noii magneți permanenți au mărit gradul de aplicabilitate a dispozitivelor de prindere magnetice. Astfel aceste noi dispozitive pot fi utilizate pe mașinile cu cinci axe pentru frezări grele, găuriri etc.

Există trei tipuri de dispozitive magnetice: cu magneți permanenți, cu electromagneți și cu magneți permanenți-electromagneți (MPE), ultimul apărut acum câțiva ani. În acest articol sunt analizate doar dispozitivele de prindere cu MPE.

2. Dispozitive de prindere cu magneți permanenți-electromagneți

Uzual dispozitivele cu MPE folosesc magneți NdFeB (niobiu, fier, bor) și aliaje AlNiCo compuse din aluminiu, cobalt, cupru, fier și titan. Magneții NdFeB sunt mai mici și mai puternici decât alte tipuri de magneți permanenți. Pe lângă magneții NdFeB, MPE utilizează magneți AlNiCo pe post de comutatoare. MPE poate fi activat sau dezactivat

Abstract. In the last decade new innovations like permanent-electro magnets and permanent magnets have greatly increased the applicability of the magnetic fixtures. An attempt at summarizing and analyzing the recent development in the field of the magnetic workholdings and especially of the electro-permanent magnetic fixtures is made.

Key words: magnetic workholding, permanent-electro magnet, magnetic fixture analysis

1. Introduction

The new NC 3+2 multi-axis and 5-axis machines permit multi-sided access to pallet-mounted workpieces, provide high locating accuracy, reduce setup time, and help manufacturers increase productivity. They are well suited for the workpieces with complex geometry.

The five-axis machines are becoming more popular and suppliers have developed special workholding systems to address the peculiar difficulties with fixturing. Thus, the main objectives of these special workholding systems are: to lift the workpiece away from the worktable surface, position it in the best location/orientation for cutting operations and grip it securely [1].

New innovations like powerful permanent electro magnetic blocks and new powerful permanent milling magnets have greatly increased the magnetic fixtures usefulness. Thus, these new workholdings can be mounted on the five axis machines for hard duty milling, drilling etc.

There are three types of magnetic workholdings: permanent, electromagnetic and electro-permanent magnetic (EPM), the last system came into being a few years ago. In this paper only EPM fixtures are analyzed.

2. Electro-permanent magnetic workholdings

Usually EPM chucks use the NdFeB magnets (niobium, iron, boron) and AlNiCo alloys basically consist of aluminium, nickel, cobalt, copper, iron and titanium. NdFeB magnets are smaller and more powerful than other types of permanent magnets. In addition to NdFeB magnets EPM also use AlNiCo magnets as the magnetic switch. The EPM can be

prin schimbarea polarității magneților AlNiCo, sub acțiunea unui impuls electric. Ciclul durează mai puțin de o secundă. Aceștia necesită alimentare doar pentru comutarea dintr-o stare în alta, curentul electric nefiind necesar pentru menținerea câmpului magnetic.

În figura 1 sunt reprezentate cele două stări ale unui dispozitiv cu MPE. Acesta are în componență: 1- bobină; 2- magnet NdFeB; 3- magnet AlNiCo; 4- pol magnetic; 5- câmp magnetic; 6- semifabricat. Când tensiunea este aplicată în sensul energizării, pachetul de magneți AlNiCo este polarizat în același sens cu cel al magneților NdFeB. Cele două pachete de magneți dezvoltă un câmp care se închide prin suprafața superioară a dispozitivului de prindere (starea activată). Când tensiunea este aplicată invers, pachetul magnetic AlNiCo este magnetizat invers. Câmpul magnetic se închide intern, pe calea mai scurtă (starea dezactivată).

turned on or off by changing the polarity through a pulse of electric current. This cycle takes less than one second. Permanent electro magnets only require electricity to turn the magnet on and off, no electricity is required to maintain the magnetic field.

In the figure 1 the two states of EPM workholding are represented. The components are: 1- coil; 2- NdFeB magnet; 3- AlNiCo magnet; 4- magnetic pole; 5- magnetic field; 6- workpiece. When the voltage is applied in energize direction the AlNiCo magnetic pack is charged in the same magnetic polarity as the permanent NdFeB magnetic pack. The two magnetic packs develop a magnetic field that is forced out of the surface of the fixture (the on state). When the voltage is applied in opposite direction, the AlNiCo magnetic pack is magnetized in the opposite polarity. The magnetic field is then shorted internally (the off state).

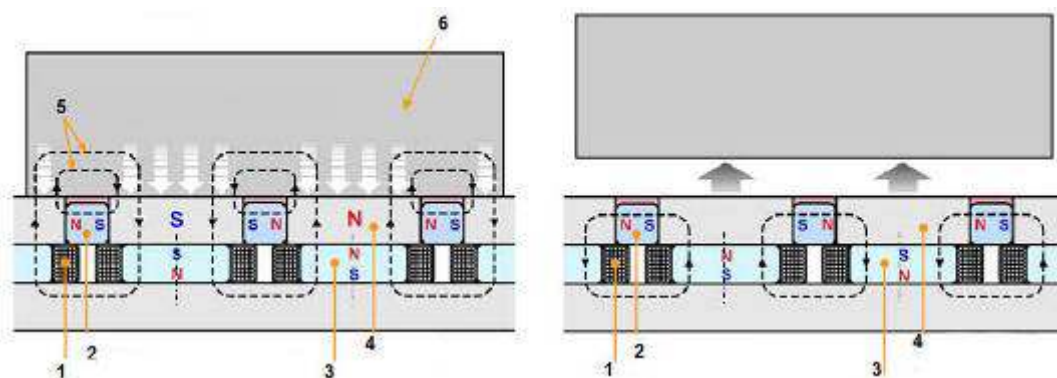


Figura 1. Stările activat și dezactivat ale unui dispozitiv de prindere cu MPE [2]

Figure 1. The on an off states of the EPM workholding [2]

Structura unei plăci cu MPE este, figura 2: 1-placa superioară cu canale T, materialul este din oțel moale monobloc, polii sunt delimitați de canalele T, placa este rigidă și robustă, este perfect izolată; 2- alezaje în care se montează module extensii; 3- conector electric rapid și etanș; 4- magnet permanent NbFeB; 5- bobină; 6- placă inferioară; 7- șurub; 8- magnet polarizabil AlNiCo.

Intensitatea câmpului magnetic poate fi controlată prin nivelul de magnetizare a magneților polarizabili AlNiCo. Deoarece magneții permanenți sunt sensibili la temperatură, dispozitivele de prindere cu MPE își pierd proprietățile dacă sunt expuse la temperaturi ridicate. O caracteristică importantă este magnetismul rezidual, valorile uzuale sunt de aproximativ 20 Gauss. Fixarea prin câmp magnetic este eficientă dacă acesta se închide complet prin piesă. Dacă câmpul este mai înalt decât grosimea semifabricatului, forța de fixare este diminuată și poate deveni insuficientă pentru o prindere sigură.

The structure of the EPM plate is, Figure 2: 1-upper plate with T-slots is machined from a single block of mild steel, the poles are demarcated by T-slots, this plate is a rigid and robust, 100 % leak proof; 2- holes for extension modules; 3- fast waterproof electric connector; 4- permanent NbFeB magnet; 5- coil; 6- lower plate; 7- screw; 8- polarized AlNiCo magnet.

The amount of magnetic field can be controlled by the level that AlNiCo switchable magnetic pack is magnetized. Because the permanent magnetic material is heat sensitive, the EPM workholdings loses magnetic properties if they are exposed to a high temperature. An important feature is residual magnetism, 20 Gauss is an usual value left after unclamping. Magnetic field performs only when the flux is concentrated on the piece to be held. If the magnetic field exceeds the thickness of the workpiece, it will decrease and may become inadequate for a safety machining.

Deoarece sculele centrelor de prelucrare cu cinci axe atacă piesa din mai multe părți și direcții sunt necesare extensii fixe (poziția 2 în figura 3) și mobile (poziția 3 în figura 3), cu rol de interfețe între suprafața activă a dispozitivului magnetic și piesă. Extensiile mobile permit autoajustarea pe înălțime a suprafeței de lucru la forma locală, deformată a piesei. Modulele extensii ale polilor sunt făcute din oțel moale cu permeabilitate magnetică ridicată, în scopul permiterii unei transmiteri optime a fluxului magnetic.

Because the cutting tools of the 5-axis machines can reach the workpiece from many sides and many angles, the solid (position 2 in Figure 3) and mobile (position 3 in Figure 3) pole extensions are necessary as interfaces between the active surface of the magnetic chuck and workpiece. The mobile extensions allow the automated height adjustment of working surface to the local deformation of workpiece. The pole extensions are made of high magnetic permeability soft steel in order to allow an optimal transmission of magnetic flux.

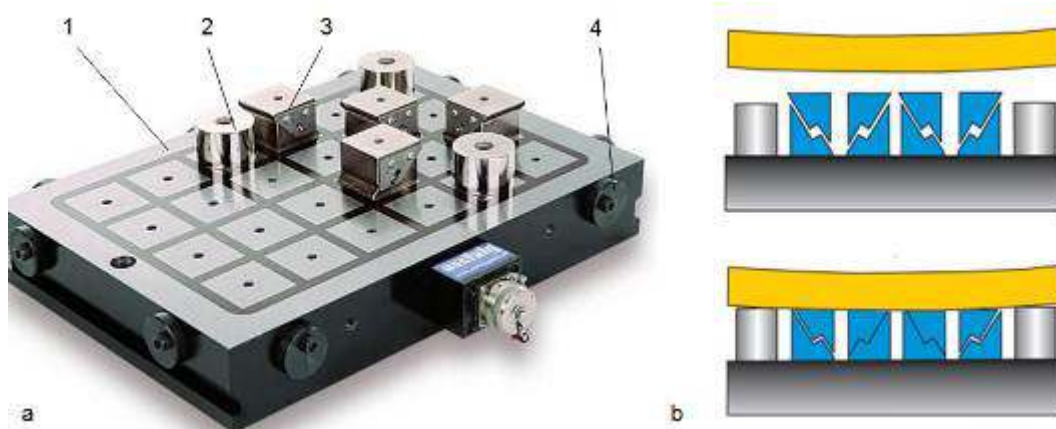


Figura 3. Extensiile fixe și mobile ale polilor unui dispozitiv de prindere cu MPE [3]
Figure 3. Solid and mobile pole extensions of the EPM workholdings [3]

O caracteristică relevantă a platourilor cu MPE este forța specifică dezvoltată de câmp. Valorile uzuale sunt de 100-200 N/cm², dar mai frecventă este 150 N/cm². După cum se poate vedea în figura 4, în condiții ideale forțele generate sunt foarte mari. Dacă se consideră că forța de fixare normală pe suprafața activă a magnetului este 100%, atunci forța tangențială este 20% din prima.

A relevant feature of the EPM plates is the magnetic field strength. The usual values are 100-200 N/cm², but 150 N/cm² is a more frequently. As can be seen in Figure 4, huge forces are generated if ideal conditions are fulfilled. If is considered that magnet has 100% clamping force directly away from the face of the magnet, then only 20% clamping force against slide forces.

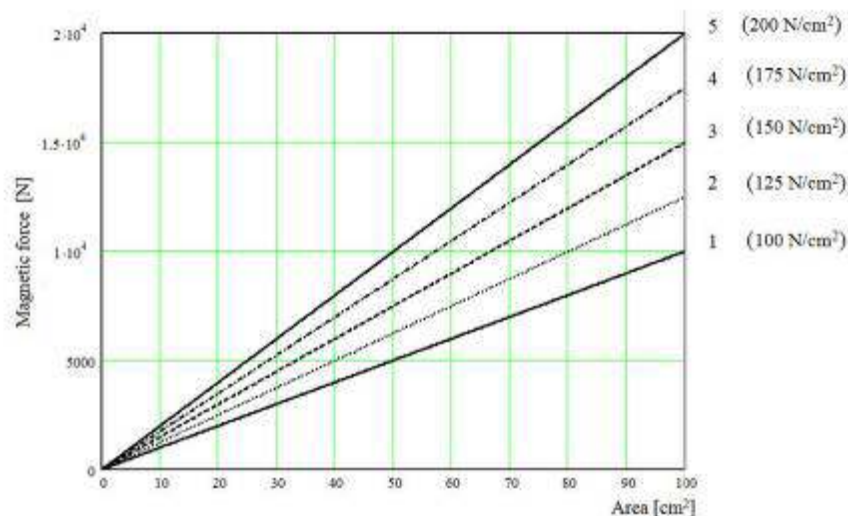


Figura 4. Strângerile normale dezvoltate de MPE cu diferite forțe specifice
Figure 4. EPM normal clamping forces developed by the several specific forces

Forța specifică efectivă poate fi mult mai mică, deoarece: înălțimea câmpului magnetic este mai mare decât grosimea piesei; sunt utilizate extensii pentru polii magnetici; există un spațiu între suprafața de lucru a MPE și piesă (figura 5), cauzat de neregularitățile semifabricatului, de suprafața rugoasă, de interstiții nemagnetice sau vibrații; materiale diferite de oțelul mediu 0,16 - 0,29% carbon (figura 4), de exemplu oțelul de scule este cu 15-30% mai puțin permeabil magnetic și oțelul turnat cu 15-30% [1].

Effective magnetic specific force can be much smaller, because: magnetic penetration depth exceeds the thickness of the workpiece; pole extensions are used; being of air gaps between the EPM fixture working surface and piece (Figure 5), caused by uneven workpieces, rough finish on a workpiece, nonmagnetic spacers or vibration; less permeable materials than mild steel (0.16 - 0.29% carbon) (Figure 4), for example tool steels are 15 to 30% less permeable and cast iron is 30 to 50% less permeable[1].

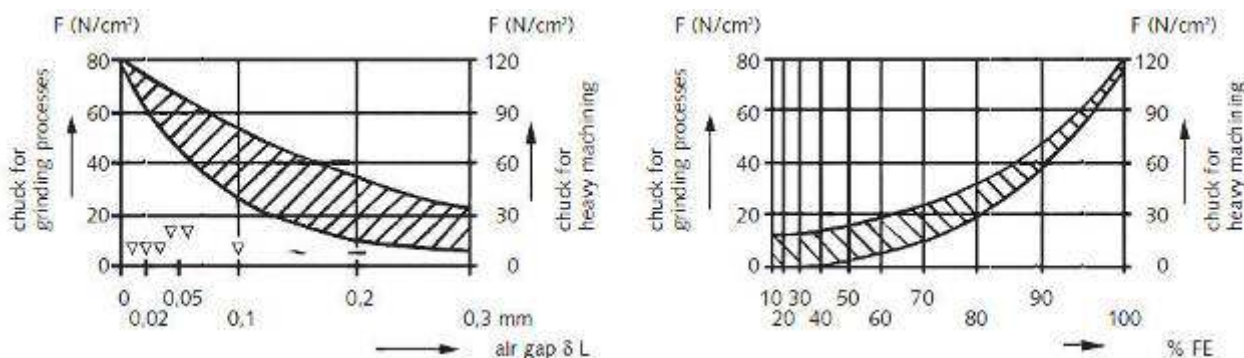


Figura 5. Dependențele forței de fixare magnetice de calitatea suprafeței de fixare și de procentul de Fe [5]

Figure 5. Holding power in relation to the clamping surface quality and material [5]

Alt factor important este mărimea suprafeței piesei în contact cu polii magnetici. Forța de fixare a piesei este determinată de numărul egal de poli nord și sud cu care este în contact semifabricatul.

Formele polilor magnetici sunt: pătrate, circulare, hexagonale și lamelare.

Distanțe mai mari între poli produc câmpuri magnetice mai înalte și sunt ideale pentru piese groase sau mari și când se utilizează module extensii. Distanțe reduse între poli produc linii de forță magnetice de înălțime mai mică și în consecință sunt utilizate pentru piese subțiri sau de dimensiuni mici.

Deoarece forțele de așchiere sunt de obicei multidireționale și datorită numărului mare de parametri care afectează câmpul magnetic o modelare matematică a dispozitivelor bazate pe MPE este dificilă. Puțini producători de dispozitive magnetice oferă relații de calcul pentru determinarea parametrilor procesului de așchiere și a forțelor de fixare magnetice [7].

Dispozitivele modulare cu MPE sunt soluția cea mai potrivită pentru producția flexibilă [7, 8, 9]. De exemplu, modulele Double-Mag [7] cu două suprafețe magnetice au următoarele caracteristici: sunt ușor de fixat pe masa mașinii prin forță magnetică, nefiind necesare alte elemente mecanice; modulele pot fi conectate, astfel pot fi fixate piese de dimensiuni mari (figura 6, d și e); modulele cu poli

Another significant factor is the workpiece area in contact with the magnetic poles. The number of equal north and south poles that are in contact that determine the clamping force.

The shapes of the magnetic poles are: square, circular, hexagonal and lamellar.

Greater pole distances produce greater depth effect of the magnetic field and are ideal for thick or large workpieces and when the extension modules are used. Narrow pole distances produce flat lines of force and are therefore used for thin or small workpiece.

Because the cutting forces are usually multi-directional, and the great number of magnetic field parameters, the mathematical modeling of the EPM workholdings is difficult. Few manufacturers of the magnetic fixtures offer cutting formulas to aid in the determination of viable cutting parameters and the magnetic clamping forces [7].

For flexible production the modular EPM fixtures are the best solution [7, 8, 9]. For example the both-sided EPM clamping elements Double-Mag [7] have following features: are easy clamped on the machine table by means of the magnetic force, no mechanical clamping are needed; several modules can be interconnected, so big workpieces can be processed (Figure 6, d and e); square poles

de dimensiuni 50×50 mm dezvoltă forțe de 3500 N; adâncimea de penetrare a câmpului este de 10 mm.

50×50 mm; adhesion force is 3500 N; penetration depth of the magnetic field 10 mm.

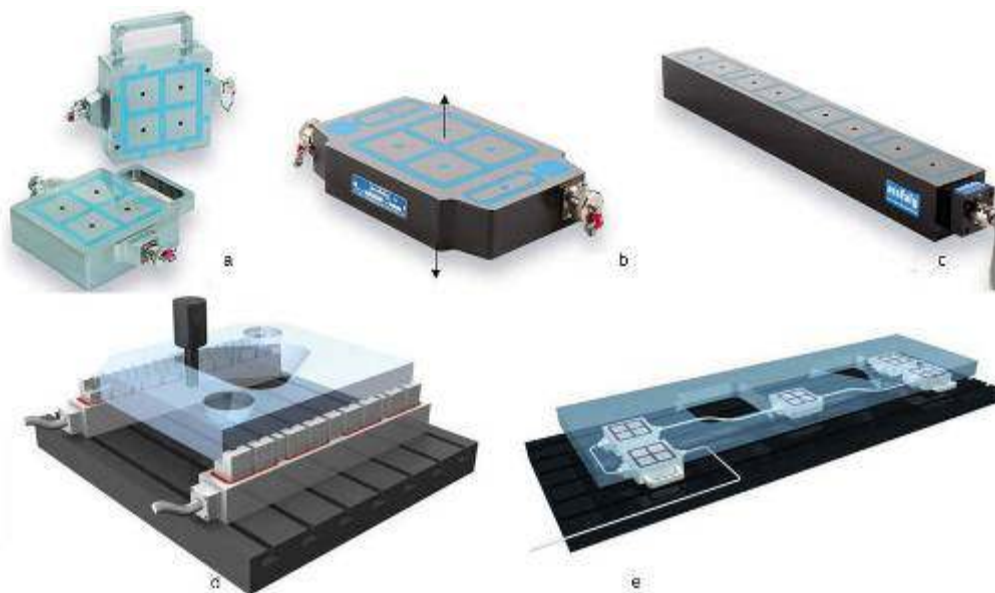


Figura 6. Sistemul modular de prindere EPM Double-Mag [7]
Figure 6. Double-Mag EPM modular clamping system [7]

O altă tendință este utilizarea modulelor circulare cu MPE, figura 7.

Another trend is to use circular EPM modules, Figure 7.

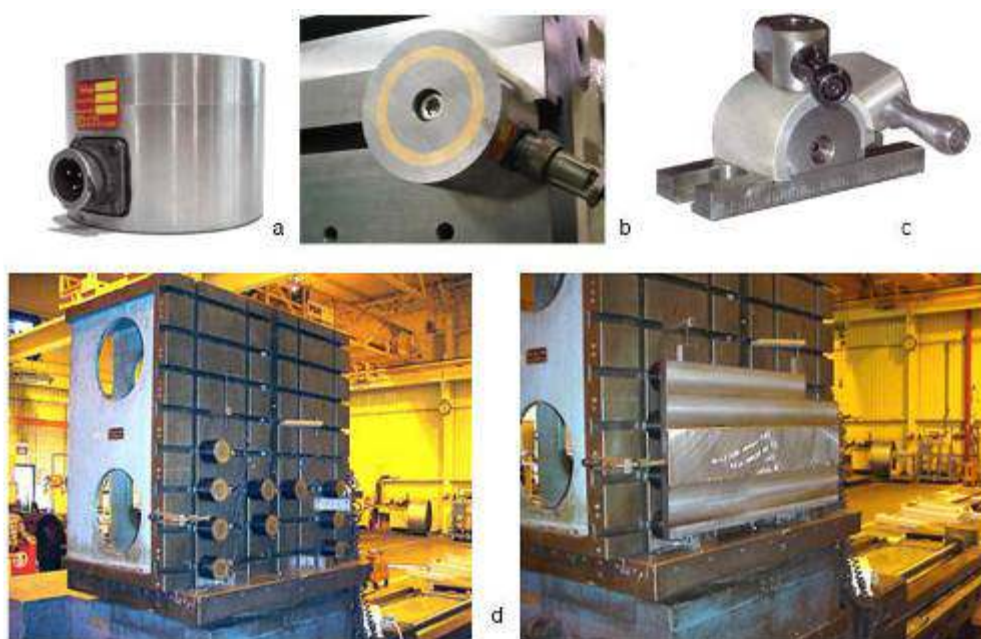


Figura 7. Sistemul modular de prindere cu MPE A-Pod [8]
Figure 7. A-Pod EPM modular clamping system [8]

Modulul A-Pod [8] conține un MPE (figura 7, a și b), are diametrul de 97 mm și înălțime de 71 mm, dezvoltă o forță de 6700 N, fluxul magnetic care pătrunde în piesă are o înălțime mai mică de 17 mm, astfel minimizându-se efectele parazite. Alt modul este A-Stop (figura 7, c). Acest reazem mobil

A-Pod module [8] is a self-contained EPM (Figure 7, a and b), 97 mm diameter and 71 mm height, clamping force is 6700 N, magnetic flux emanates less than 17 mm into the workpiece minimizing the negative effects of the stray flux. Another module is A-Stop (Figure 7c). This

lucrează cu A-Pod. Asigură o poziționare precisă cu repetabilitate de 0,05 mm și este retractil pentru a facilita accesul sculei la prelucrarea completă de conturare exterioară.

Funcția polilor magnetici este de a genera forțele de fixare, dar o poziționare și orientare precisă a semifabricatului este realizată de reazeme mecanice ca cel din figura 7c sau poziția 4 din figura 3. Dacă este necesar, reazemele mecanice sunt îndepărtate sau basculate după ce semifabricatul a fost poziționat și fixat magnetic. Astfel sculele nu sunt restricționate la așchiera piesei.

Plăcile cu MPE făcute integral din oțel cu poli pătrați și canale T sunt universale, fiind capabile să poziționeze, să orienteze și să fixeze piese magnetice sau nu (figurile 2 și 8).

retractable locator is designed to work in conjunction with A-Pod. It provides an accurate repeatable location 0.05 mm and is fully retractable to facilitate tool access for full edge machining.

The function of the magnetic poles is to generate the clamping forces, but an accurate position and orientation of the workpiece is realized by mechanical locators like the locator from Figure 7c or locator 4 from Figure 3. If it is necessary, the locators are removed or rotated after locating and magnetic clamping of the workpiece. So, the cutting tools are not restricted to process the workpiece.

Full steel EDM plates with square poles and T-slots are universal and suitable to locate and clamp magnetic or nonmagnetic workpieces (Figures 2 and 8).

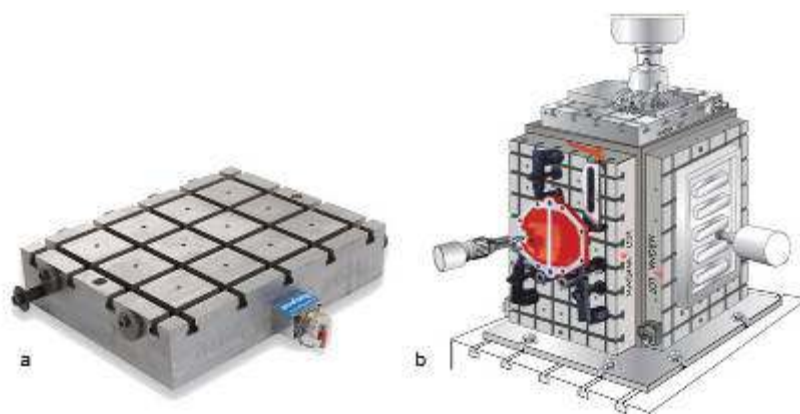


Figura 8. Placa magnetică EPM MAGNASLOT [3]

Figure 8. EPM MAGNASLOT plate [3]

Pentru strunjiri și rectificări rotunde sunt necesare dispozitive speciale cu MPE. Se folosesc două tipuri de mandrine cu MPE: unul pentru piese circulare fără alezaj central și altul pentru piese inelare, chiar de dimensiuni mari. Pentru prima categorie de mandrine este necesară o forță magnetică uniformă pe toată suprafața de fixare, acestea având poli sinusoidală, circulari sau radiali, figura 9.

For turning and round grinding special EPM chucks are necessary. Two different EPM chucks are used: for thin circular workpieces without central hole and for rings, even of big dimensions. The first chucks need a uniform magnetic holding force over the complete clamping surface with sinusoidal, ring or radial pole spacing, Figure 9.



Figura 9. Mandrine cu MPE pentru piese circulare subțiri [10]

Figure 9. EPM chucks for thin circular workpieces [10]

Mandrine cu MPE pentru piese inelare au poli radiali și complementar canale T radiale [7, 9].

The EPM chucks for rings have radial poles and complementary radial T-slots [7, 9]. In this way

Astfel modulele extensii pot fi ușor repositionate. Extensii ale polilor ca cele fixe, extensibile, extensii de colț, module purtătoare de bolțuri de referință și alte elemente adiționale sunt disponibile în scopul prelucrării pieselor cu suprafețe interioare și exterioare.

O problemă este centrarea semifabricatului. Uzual se folosesc două metode eficiente: un sistem combinat magnetic-mecanic autocentrant (figura 10a) sau, când mandrinul este slab magnetizat, piesa este centrată folosindu-se mașina-unealtă și o rolă pentru a deplasa piesa în poziția corectă (figura 10b).

the extension modules can be easy relocated. Pole extensions such as fixed, extensible, wedged, extensions with reference pins, and additional elements are available, in order to machine outer and inner surfaces of the parts.

A problem is workpiece centering. Usually two efficient methods are used: combi magnetic and mechanical self-centering clamping system (Figure 10a) or when the chuck is magnetized at low level the piece is centred using the machine itself and a roll to move the part in the correct position (Figure 10b).



Figura 10. a) Mandrină combinată cu MPE și sistem mecanic autocentrant; b) metoda de centrare cu rolă [7]
Figure 10. a) Combi chuck EPM and mechanical self-centring system; b) centering method with a roll [7]

Combinând un mandrin clasic, autocentrant, cu o placă circulară cu MPE se obțin câteva rezultate remarcabile: timpii de set-up se reduc drastic, de exemplu pentru acționarea pneumatică a mandrinei timpii de set-up se reduc până la 80%; datorită suprafeței mari de prindere magnetică piesa își conservă forma; prelucrarea decurge fără vibrații și deformări.

Pentru strunjiri grele și precise ale pieselor inelare cu suprafețe de așezare relativ mici este necesar un câmp magnetic puternic și concentrat. O soluție inovativă care apelează la un circuit magnetic bidirecțional este propusă de TECHNOMAGNETE [7]. Forța de fixare magnetică este dublă, asigurând o mai bună contracarare a interstițiilor de aer. Forma optimizată a circuitului magnetic, de coroană, concentrează forța unde este nevoie, iar câmpul lateral este practic nul.

4. Concluzii

Dispozitivele de prindere cu magneți permanenți-electromagneți s-au dezvoltat puternic în special datorită îmbunătățirilor aduse de magneții NdFeB și AlNiCo. Acestea pot fi folosite la operații grele de frezare și strunjire, și desigur la rectificare. În zilele noastre tehnologia MPE a atins maturitatea. Există o mulțime de dispozitive cu MPE și accesorii, tehnologia MPE este aplicată și ca sistem rapid de

Combining a classic self-centering chuck and a round EPM clamping plate, some remarkable results are obtained: set-up times are drastic reduced, for example set-up times for pneumatically actuated combi fixtures are reduced up to 80 percent; due to the large surface magnetic clamping the workpieces retain their shape; machining is completely free of vibrations and deformations.

For heavy duty and precision turning of the rings, because the primary locating face has a relatively low area, a strong and concentrated magnetic field is necessary. An innovative solution is proposed by TECHNOMAGNETE: bidirectional magnetic circuit [7]. The magnetic force is double, providing better performance against air gaps. The optimized crown shape of the magnetic flux concentrates the force where is needed, and the stray flux is null.

4. Conclusions

Electro-permanent magnetic workholding has made significant strides, especially with the advancements in NdFeB and AlNiCo magnets. These workholdings can be used for heavy duty and precision milling or turning, and obvious for grinding. Today the EPM technology has achieved maturity. There are a lot of EPM fixtures and accessories, EPM technology is applied as a quick

schimbare la matrițele de injecție plastic sau cauciuc pe mașini verticale sau orizontale [2, 11, 12].

Principalele beneficii ale alegerii unui sistem de fixare cu MPE sunt: nu este necesară electricitate pentru menținerea câmpului magnetic, dispozitivul consumă curent mai puțin de o secundă la magnetizare și demagnetizare; nu se încălzește; nu are piese în mișcare; acesta este sigur, deoarece dacă în timpul prelucrării se întrerupe curentul dispozitivul rămâne magnetizat; câmpul magnetic este uniform distribuit pe suprafață, permite o fixare fără deformații; dispozitivele cu PME permit sculei să atace piesa din mai multe direcții și unghiuri; magnetii reduc vibrațiile astfel scula poate așchia mai rapid și pe o perioadă mai lungă de timp; forța magnetică de fixare este ajustată după necesități; dispozitivele cu PME pot fi paletizate.

Limite ale dispozitivelor de prindere cu MPE: ciclul de desfacere este relativ lung 15-20 sec. comparativ cu cel de magnetizare deoarece așchiile trebuie îndepărtate cu aer comprimat; frecvență limitată de comutări.

Deoarece fixarea magnetică depinde de un număr destul de mare de parametri aleatori, puțini producători de MPE oferă formule, și acelea empirice, pentru parametrii de așchiere prin frezare.

Utilizatorii de dispozitive cu MPE estimează că set-up-ul se reduce în medie cu 50%, prin micșorarea numărului acestora și prin scăderea duratelor. În plus, mulți utilizatori ai dispozitivelor cu MPE estimează că investiția se amortizează în mai puțin de un an [4].

Actualmente dispozitivele de prindere cu PME au aproximativ aceeași masă și cost cu sistemele electromagnetice comparabile ca performanțe.

change system for plastic and rubber injection mold machines, either vertical or horizontal [2, 11, 12].

The main benefits for choosing an EPM clamping system are: no electricity is required to maintain the magnetic field, the fixture absorbs power less one second during magnetizing and demagnetizing phase; no heat generation; no moving parts; is safe because if during machining the current is cut out, the fixture remains magnetized; the magnetic field is uniformly distributed along the surface, it allows a clamping without deformation; EPM fixtures allow the cutting tool to reach the workpiece from many sides and many angles; magnets reduce vibration, therefore tooling is freer to run faster and longer; the magnetic fixing force is electronically proportioned to machining; EPM fixtures can be palletized.

Limitations of the EPM workholdings: release cycle is relatively long 15-20 sec. by comparison to magnetization phase, because cutting chips must be cleaned by air blow; limited number of times per minute switches.

Because the magnetic clamping depends on great number of random parameters, few manufacturers of EPM fixtures offer empirical cutting formulas of the milling parameters.

Users of EPM workholding estimate that setup reduction averages 50 percent through a reduced number of setups and a reduction in overall setup time. In addition, most users of magnetic workholding also estimate that payback takes less than a year [4].

In our days EPM workholdings are closer in weight and cost to the electromagnet systems having comparable performances.

References

1. Albert, M. (2011) *Get That Part of the Table*. Modern Machine Shop, no. 5/24, Available from: <http://www.mmsonline.com/articles/get-that-part-off-the-table>, Accessed: 12/01/2011
2. Pascal Corp., Available from: <http://www.pascaleng.co.jp>, Accessed: 6/01/2011
3. ASSFALG GmbH, Available from: <http://www.assfalg-gmbh.de>, Accessed: 6/01/2011
4. Evans B., (2002) *Increase Profitability Through Magnetic Workholding*. MoldMaking Technology e-newsletter, Available from: <http://www.moldmakingtechnology.com/articles/increase-profitability-through-magnetic-workholding>, Accessed: 18/01/2011
5. Bakker Magnetics b.v., Available from: <http://www.baktermagnetics.com>, Accessed: 6/01/2011
6. SPD S.p.A., Available from: <http://www.spd.it>, Accessed: 15/01/2011
7. TECHNOMAGNETE, Available from: <http://www.tecnomagnetete.com>, Accessed: 15/01/2011
8. Alpha Machining & Grinding, Inc., Available from: <http://www.alphaworkholding.com>, Accessed: 15/01/2011
9. SCHUNK GmbH & Co.KG., Available from: <http://www.schunk.com>, Accessed: 26/01/2011
10. Wagner Magnete GmbH & Co. KG., Available from: <http://www.wagner-magnete.de>, Accessed: 26/01/2011
11. Carr Lane Roemheld Mfg. Co., Available from: <http://www.clrh.com/hilma>, Accessed: 26/01/2011
12. Straubli Group., Available from: <http://www.straubli.com>, Accessed: 16/01/2011