

Robotsko mikrokovanje

Matej MIKLAVČIČ, Mitja MUHIČ

Izveček: Kontroliran postopek mikrokovanja (angl: Shot Peening) je že dlje časa znana površinska obdelava v hladnem, uporabljena predvsem pri izdelavi dinamično obremenjenih mehanskih komponent. Mikrokovanje je močno kontrolirana obdelovalna operacija, s katero se povečajo trajne dinamične trdnosti in korozijske odpornosti obremenjenih površin elementov.

Za doseganje želene produktivnosti, učinkovitosti, ponovljivosti in praktične uporabnosti obdelanih izdelkov je pri samem postopku potrebno spremljati procesne parametre, ki opisujejo obdelovanec, in parametre same obdelave. Tovrstni sistemi so za aplikacije v letalski industriji strogo specificirani po aktualnem standardu SAE AMS-2432.

Uporaba računalniško vodenega robotskega mikrokovanja omogoča proizvajalcem komponent doseganje strogih zahtev, ki jih narekuje proces. To še posebej velja za področje izdelave visoko učinkovitih turboreaktivnih motorjev, kjer se zaradi kompleksnih geometrij in vse strožjih zahtev klasične metode ne uporabljajo več.

Ključne besede: mikrokovanje, zaprtozančna regulacija, robotska manipulacija, ponovljivost, fleksibilnost, učinkovitost, procesno vodenje, zajemanje podatkov, procesna zgodovina

■ 1 Uvod

Proces obstreljevanja površine s sferičnimi delci je pomembna in že dolgo poznana površinska obdelava v hladnem. Osnova procesa mikrokovanja je obstreljevanje površine obdelovancev s sferičnimi delci z visoko hitrostjo. Vsak strel, ki zadene predmet, posledično ustvari plastično deformacijo površinskega sloja, podobno kot udarec majhnega kladiiva. Intenzivnost posameznega udarca je funkcija kinetične energije delca in kota, pod katerim delec zadene ob obdelovano površino. Na površinski plasti obdelovanca prihaja do povečanja trdote, nastajanja kompresijskih zaostalih napetosti, spremembe površinske topografije in v nekaterih primerih do možnosti strukturnih sprememb (razpad zaostalega avstenita). Vse to vodi k povečanju dinamične trdnosti elementov, ki so bili obdelani s postopkom mikrokovanja. Vpliv prej omenjenih učinkov na poveča-

nje dinamične trdnosti ni odvisen samo od trdnosti izpostavljenega materiala, ampak tudi od procesnih pogojev samega postopka.

Za razliko od klasičnega peskanja, ki se uporablja za čiščenje površine obdelovancev s curkom drobnih abrazivnih delcev, pa se mikrokovanje uporablja za učvrstitev oz. izboljšanje površine. To se izvaja z reguliranim curkom majhnih krogelnih delcev, ki so lahko iz jekla, litega železa, stekla in keramike.

Obvladovanje procesa obdelave je vse prej kot enostavna tehnologija, saj je za doseganje ustrezne produktivnosti, učinkovitosti, ponovljivosti in praktične uporabnosti obdelanih izdelkov pri samem postopku potrebno natančno regulirati procesne parametre, ki opisujejo obdelovanec in obdelavo [1].

■ 2 Standard SAE AMS-2432

Sodobni obdelovalni stroji za mikrokovanje temeljijo na večosnih avtomatiziranih CNC ali robotiziranih sistemih, ki morajo zadoščati strogim kriterijem specifičnih indu-

strijskih standardov, kontroli, regulaciji, ponovljivosti in natančnosti sicer težko obvladljivega obdelovalnega postopka. Tovrstni sistemi so za aplikacije v letalski industriji strogo specificirani po aktualnem standardu SAE AMS-2432.

Ta specifikacija določa zahteve za računalniško vodeno mikrokovanje obdelovanih površin, obstreljevanih z jeklenimi, steklenimi in keramičnimi delci. Uporaba računalniškega vodenega postopka zagotavlja ponovljivo doseganje želene intenzivnosti in pokritosti obdelovanih površin. Mikrokovanje po standardu SAE AMS2432 dosega ali presega zahteve podrejenega standarda SAE AMS 2430, ki ureja klasično avtomatsko mikrokovanje [2].

V tehničnih zahtevah se standard poleg vseh ostalih definiranih področij posebno orientira na opremo oz. obdelovalne stroje in specificira, da mora oprema za mikrokovanje delovati samodejno in biti računalniško nadzorovana oz. vodena. Obdelovalni stroj mora biti opremljen z računalnikom za nenehno spremljanje in beleženje specificiranih parametrov, prikaza-

Matej Miklavčič, Ferročrtalič, d. o. o., Dolenjske Toplice; doc. Dr. Mitja Muhič, Fakulteta za industrijski inženiring Novo mesto, Novo Mesto

Tabela 1. Tabela specificiranih parametrov

Parameter	Enota	Procesna toleranca
		Plus ali minus
		Meja izklopa
Pretok medija (za vsako posamezno šobo)	kg/min	10 %
Zračni tlak (za vsako posamezno šobo)	kPa	>20 psi 10 % <20 psi 20 %
Hitrost centrifugalnega kolesa	obr/min	>2000 1 % <2000 20
Hitrost pomika šobe ali centrifugalnega kolesa	mm/min	10 %
Hitrost pomika deflektroja	mm/min	10 %
Čas izklopa šobe ali kolesa	s	1
Hitrost vrtljive mize	obr/min	10 %
Hitrost obdelovanca	mm/min	10 %
Hitrost transportne proge	mm/min	10 %
Čas obdelovalnega cikla	s	1
Pozicija šobe ali kolesa	mm/°	1,57 / 5
Pozicija vrtljive mize ali kosa	mm/°	1,57 / 5

nih v tabeli 1, ki morajo biti ves čas procesa v navedenih tolerančnih mejah. Sistem shranjevanja in arhiviranja podatkov mora biti v tiskani oz. fizični formi ali alternativni obliki zapisa, ki jo odobri odgovorna inženirska organizacija. Stroj mora omogočiti regulirano pospeševanje sferičnih delcev s stisnjenim zrakom proti obdelovancu in hkrati zagotoviti nadzorovano enakomerno gibanje bodisi obdelovanca skozi curkek delcev bodisi curka delcev čez obdelovanec, gibanje pa naj bi bilo translatorsko, rotacijsko ali kombinirano. Obdelovanec med procesom ne sme biti podvržen kakršnemu koli poljubnemu in nekontroliranemu gibanju. Stroj mora imeti sposobnost nenehnega reproduciranja zelene intenzitete obdelave.

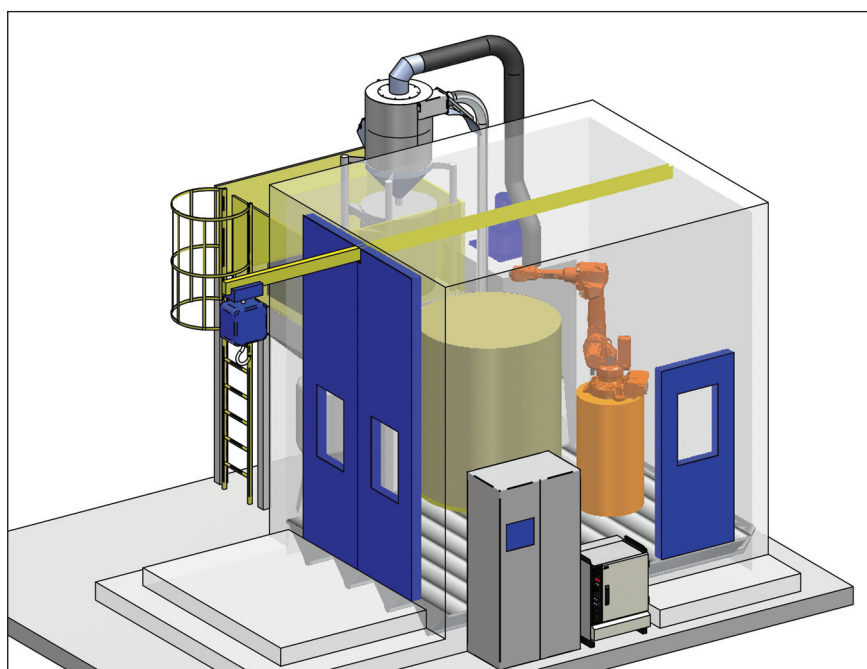
Obdelovalni sistem mora prekiniti cikel v manj kot eni sekundi, če kateri od parametrov gibanja, zračnega tlaka ali masnega pretoka medija ni več v tolerančni meji. Sistem mora shraniti v spomin in izpisati pogoje prekinitve za parametre iz *tabele 1* ter nadaljevati operacijo za dokončanje procesnega cikla od točke zaustavitve dalje. Med prekinitvijo mora biti procesirani obdelovanec identificiran na poročilu operacije ali računalniškem izpisu.

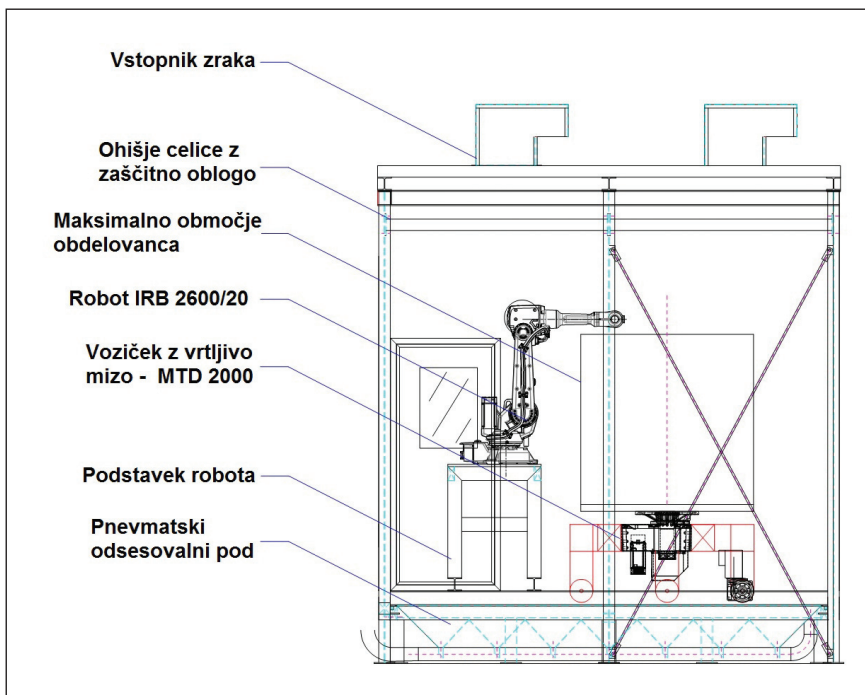
Poleg navedenih parametrov in zahtev, ki so omejeni na nadzor, regulacijo, ponovljivost in arhiviranje postopkov, standard opredeljuje še vrsto zahtev s področja opremljenosti, verifikacije in specifičnih lastnosti postopka mikrokovanja. Prispevek se bo osredotočil na zagotavljanje parametrov, povezanih z gibanji, zračnim tlakom in masnim pretokom obdelovalnega sredstva.

3 Vloga robotike v računalniško vodenem mikrokovanju

Uporaba računalniško vodenih večosnih robotov je proizvajalcem opreme omogočila sledenje vse strožjim zahtevam in standardom, kot npr. SAE AMS 2432, ki jih narekuje proces mikrokovanja. Pred uveljavitvijo robotov in večosnih CNC-manipulatorjev se je postopek zanašal zgolj na »trdo avtomatiko«, največkrat samo z enoosno manipulacijo obdelovalnih šob. Posledica tega sta bili preveč intenzivna obdelava enega območja obdelovanca zaradi doseganja ustrezne pokritosti preostalega dela ali nezadostna obdelava težje dostopnih območij. V najboljšem primeru so bile specifikacije mikrokovanja mnogih kritičnih komponent ogrožene, saj konvencionalne metode niso mogle zagotoviti enakomerne plasti tlačnih napetosti po celotni obdelovalni površini. [3]

Zaradi velikega zanašanja na operaterjev občutek in izkušnje pri nastavljanju obdelovanih šob je posledično bil večji del procesnega časa porabljen za pripravo stroja kot za obdelavo samo. Poleg problema nadzora kakovosti, pri katerem dva operaterja nista nikoli popolnoma enako nastavila šob,

**Slika 1.** 3D model sodobne robotske obdelovalne celice



Slika 2. Dispozicijska risba postavitve opreme robotske celice

je bilo veliko podjetij prisiljenih v nabavo nekaj enakih strojev za obdelavo enakih kosov, saj je dejanski aktivni čas opreme bil zelo nizek. Za namestitev vseh potrebnih kotov obstreljevanja, ki bi zagotovili polno pokritost obdelovancev, so klasični sistemi potrebovali vsaj eno šobo za vsak kot, kar pa je posledično pomenilo zelo okorno, nefleksibilno in kompleksno skupino.

Robotska manipulacija obdelovalnih šob je proizvajalcem omogočila obravnavo postopka mikrokovanja podobno kot vsak drugi CNC nadzorovan postopek, z absolutno predvidljivimi časi obdelovalnih ciklov, rezultati in stroški na posamezni cikl. S tipično ponovljivostjo postopka od $\pm 0,05$ mm na vseh linearnih oseh in $\pm 0,5^\circ$ na rotacijskih oseh, robot zlahka s samo eno šobo v programu sledi zunanjim konturam velikih in kompleksnih obdelovancev in v drugem programu pozicionira majhne rotirajoče šobe v zahtevne tehnološke odprtine.

Robotski manipulator za mikrokovanje je mogoče programirati brez direktne povezave oz. s pomočjo CAD-orodij za simulacijo in nato prenesti program v robotski kontroler. Vseeno pa večina operaterjev oz. programerjev najraje vidi dejanski relativni

položaj šobe glede na obdelovanec, zato se večina programov razvija s pozicioniranjem robota vzdolž zelene poti gibanja s pomočjo ročnih upravljalnih panelov. Daljinski ročni panel programerju omogoča vnos podatkov iz notranjosti obdelovalne celice, kot so npr. oddaljenost šobe od obdelovanca, vpadni kot in hitrost pomika, direktno v robotski kontroler, ki je pozicioniran zunaj celice. Tako pripravljen program se lahko hrani v spominu robotskega kontrolerja, na poljubnem spominskem mediju ali naloži na gostiteljski računalnik.

Poznejši klic posameznega obdelovalnega programa se lahko opravi z ročnim vnosom serijske številke obdelovanca na nadzornem računalniku ali z enostavnim odčitavanjem črtna kode, s katero je opremljen izdelek.

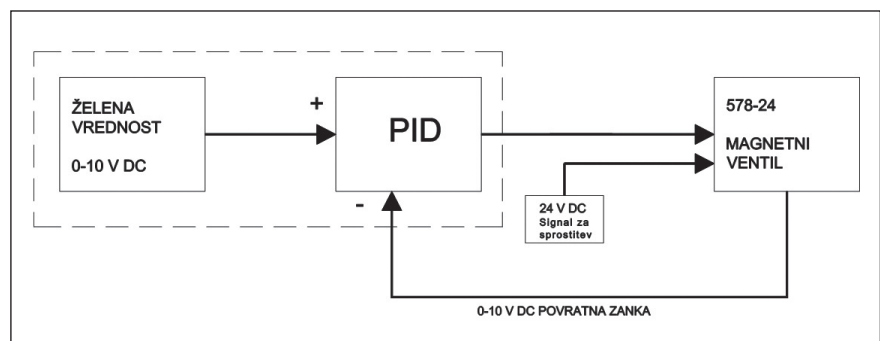
Čeprav na tržišču obstaja veliko različnih robotskih manipulatorjev, jih je le malo ustrezno prilagojenih zahtevnemu in neprizanesljivemu procesu mikrokovanja.

Zaradi agresivnosti okolja, v katerem deluje robotski manipulator, sta vzdržljivost in zanesljivost glavni merili pri izbiri opreme. Vsi gibljivi deli, tako znotraj kot tudi zunaj obdelovalne celice, morajo biti dobro zaščiteni pred abrazivnim delovanjem, značilnim za mikrokovanje.

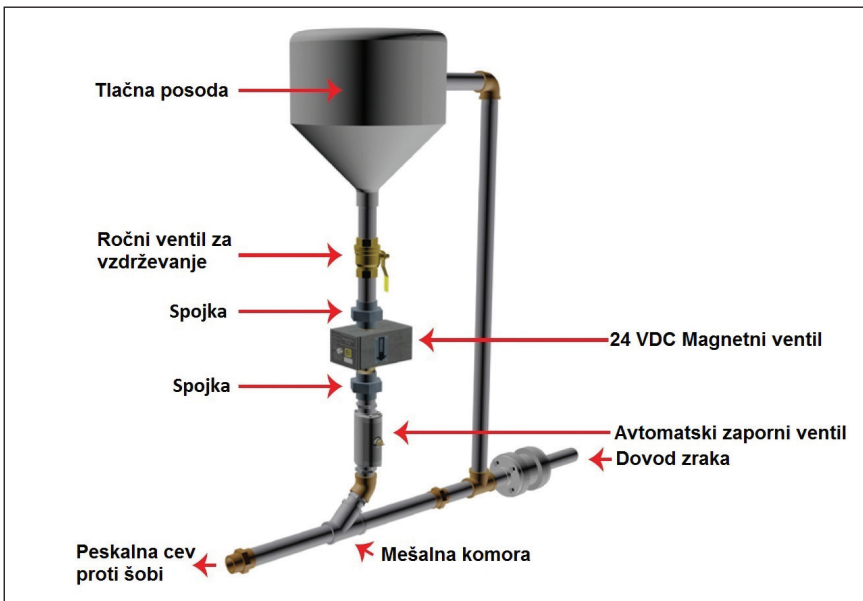
Poleg dejstva, da je robot primeren za mikrokovanje, vzdržljiv in zanesljiv, mora biti hkrati zelo natančen, ponovljiv in enostaven za programiranje. Robot mora zagotavljati široko območje delovanja in zadostno svobodo gibanja, da sledi konturi celotnega obdelovanca, še posebej pri reaktivnih motorjih, kjer so zahteve po obdelavi velikih zunanjih in majhnih notranjih radijev. Po drugi strani pa večina obdelovancev rotira ali se premika pred obdelovalnimi šobami, zato je zahtevana velika hitrost njihove manipulacije. Običajno zadoščajo linearne hitrosti 4–5 m/min in rotacije okoli $720^\circ/\text{min}$.

4 Zaprtozančna regulacija procesnih parametrov

Ne samo, da so robotski manipulatorji omogočili superiorno metodo manipulacije obdelovalnih šob v primerjavi s klasično avtomatiko, bili so ključnega pomena pri izboljšanju celotnega postopka mikrokovanja. Natančnost in ponovljivost, ki jo nudijo roboti, sta proizvajalce opreme prepričali s pokritostjo, in-



Slika 3. Regulacija masnega pretoka medija



Slika 4. Postavitev magnetnega regulacijskega ventila

tenzitetu in nasičenostjo, ki jih zahteva postopek.

Z uporabo inkrementalnih dajalnikov na servopogonih vseh robotovih osi je mogoča zaprtozančna povratna zveza, ki jo ves čas nadzira robotski kontroler.

Zaprtozančna kontrola in regulacija doziranja stisnjene zraka in masnega pretoka obdelovanega medija sta ravno tako pripomogli k zagotovitvi zanesljivega sistema mikrokovanja, ki lahko deluje brez nadzora cikla za ciklom.

Danes so na trgu različne tehnološke rešitve za regulacijo omejenih procesnih veličin. Naj samo omenimo zaprtozančno regulacijo masnega pretoka feritnega obdelovalnega medija (slika 3), ki temelji na njegovih magnetnih lastnostih. Tovrstna regulacija se izvaja neposredno z magnetnimi ventili.

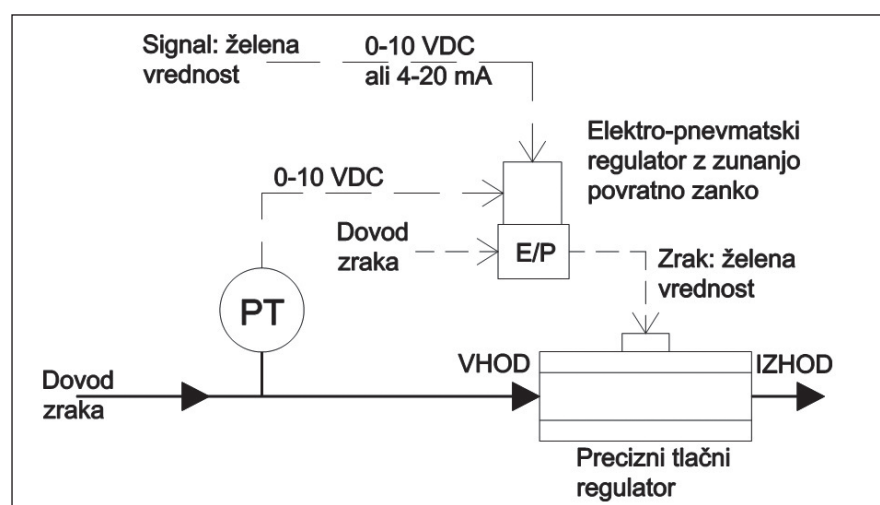
Magnetni regulacijski ventil, prikazan na sliki 4, je normalno zaprt ventil, ki regulira pretok jeklene granule ali žičnih sekancev v sistemih zračnega mikrokovanja. Vgrajeno tipalo meri masni pretok skozi magnetni ventil in skupaj z ločenim kontrolerjem zagotavlja natančen in ponovljiv pretok.

Enostavna konstrukcija ventila vsebuje močen in stabilen permanentni magnet za normalno zaprto

stanje in elektromagnet za neposredno regulacijo pretoka. Tovrstni magnetni ventili so lahko tovarniško kalibrirani za različne vrste in velikosti medijev [4].

Podobni zaprtozančni sistemi, sestavljeni iz proporcionalnega ventila oz. regulatorja in pilotnega ventila, kot je prikazan na sliki 5, se uporabljajo za natančno in ponovljivo regulacijo zračnega tlaka.

V primeru okvare katerega od nadzorovanih sistemov, se izvajanje programa nemudoma ustavi in tako prepreči morebitna poškodba obdelovanca. Ko je neželena situacija ali okvara odpravljena, se proces lahko nadaljuje od točke zaustavitve dalje in tako nadaljuje obdelavo v skladu s specifikacijo.



Slika 5. Regulacija zračnega tlaka

Postopki mikrokovanja tehnično zahtevnih letalskih komponent narokujejo posebne zahteve težko obvladljivega obdelovalnega postopka. Iz navedenih zahtev postopka je edina logična in sprejemljiva rešitev uporaba robotske tehnologije za manipulacijo obdelovalnih šob in najsodobnejših sistemov za zaprtozančno regulacijo masnega pretoka medija in delovnega zračnega tlaka.

Celoten cikel obdelave je podprt s sistemom za reciklažo in upravljanje jeklene obdelovalnega medija, ki vsebuje čiščenje, klasifikacijo velikosti in avtomatsko polnjenje tlačnih posod. Sodobni sistemi so zasnovani tako, da omogočajo delovanje z dvema ali več različnimi velikostma obdelovalnega medija.

Za nadzor nad celotnim obdelovalnim procesom skrbijo sodobni PLC-krmilniki z namensko izdelanim programskim paketom, ki je podprt s SCADA-sistemom za vizualizacijo procesa na industrijskem PC-računalniku (slika 6). Sama zasnova sodobnih SCADA-sistemov omogoča različne funkcionalnosti, kot so:

- vizualizacija procesa,
- spremljanje parametrov v realnem času,
- parametrično programiranje in klicanje programov,
- beleženje zgodovine in tiskanje poročil,
- fleksibilnost servisnih manipulacij in simulacij obratovanja.

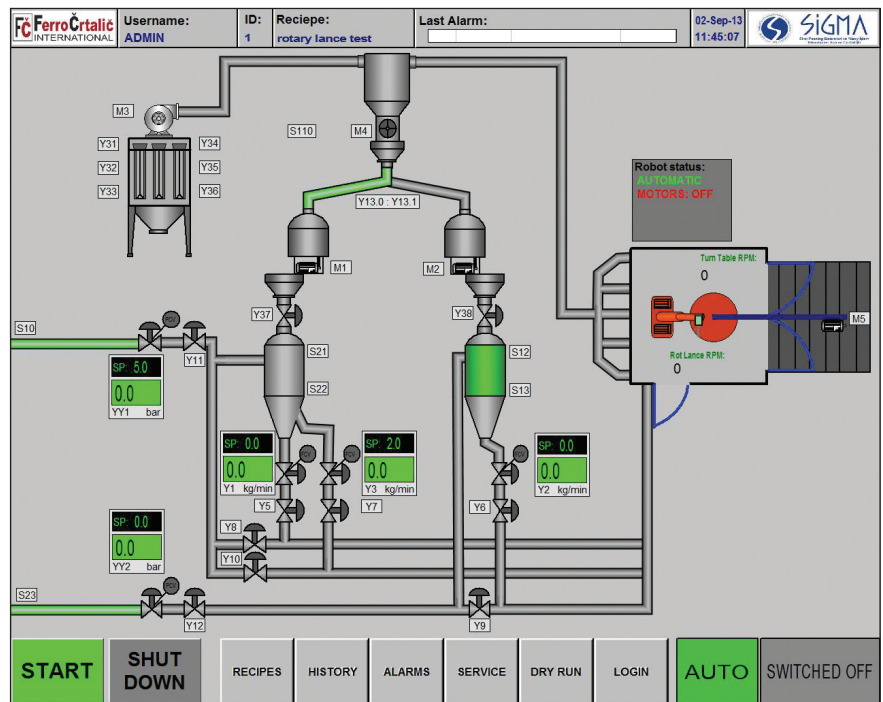
Med njimi pa najdemo prav tiste iz zahtev standarda SAE AMS 2432, ki se nanašajo na shranjevanje in arhiviranje procesnih parametrov ter njihovo poznejšo obdelavo.

5 Zaključek

Z nenehnim razvojem procesne tehnike in avtomatizacije oz. robotike je tehnologija mikrokovanja dobila svoje aplikacije v proizvodnih procesih in vzdrževanju mnogih strojnih komponent avtomobilske, letalske, procesne in druge industrije. Z vse večjimi prizadevanji letalske in avtomobilske industrije, da bi razvila izdelke z daljšo življenjsko dobo, se pojavljajo strožje in natančnejše zahteve za mikrokovanje. Robotski sistem za mikrokovanje je novo orodje, ki zagotavlja optimalno izboljšanje in podaljšanje življenjske dobe komponent.

V članku opisani sistemi omogočajo mikrokovanje izjemne kakovosti v popolnoma nadzorovanih in ponovljivih procesih. Robotski sistemi za mikrokovanje se danes uspešno uporabljajo za obdelavo zahtevnih komponent, vgrajenih v vojaška in komerciala letala[5] in s svojimi učinki pripomorejo k vsesplošni varnosti letalskega prometa.

Robotska oprema je tako pomemben in bistven korak k pripravi bodočih



Slika 6. SCADA-vizualizacija robotske obdelovalne celice

procesnih potreb površinskega učvrščevanja s tehnologijo mikrokovanja.

Literatura

- [1] Miklavčič, Matej: Uporaba Shot Peening postopka za podaljšanje dobe trajanja varjenih spojev. Avtomatizacija in robotizacija v varilni tehniki : zbornik predavanj (2014).
- [2] SEA AMS 2430 Rev D. Shot peening, Computer monitored. 2012.
- [3] De Clark, Bruce: The Role of Robotics in Computerized Shot peening, Shot Peening Theory and Appl., IITT Intl., 1991.
- [4] Electronics Inc: 24 Vdc Series MagnaValves, URL: <http://www.electronics-inc.com/24vdcseries.html>.
- [5] Sylvain Forgues, Major Jean Brosseau: Evolution of Shot Peening on the CF-18 – From OEM to Robotic, Conf Proc: ICSP-9 (pg 36–41).

Robotic Shot Peening

Abstract: A controlled process of shot peening is long known cold working process of surface treatment primarily used in the production of dynamically heavy stressed mechanical components.

Shot peening is essentially a highly controlled surface treatment operation with the aim of increasing fatigue and corrosion resistance of surfaces of stressed components.

In order to achieve the required productivity, efficiency, repeatability and practical utility of processed products it is necessary to monitor process parameters which are describing the workpiece and the parameters of the treatment itself. Such systems for applications in the aerospace industry are strictly specified by the current SAE AMS-2432 standard.

The use of a computer-controlled robotic shot peening allows manufacturers of components to achieve the strict requirements imposed by this process. This applies particularly in the field of manufacturing of highly efficient turbo-jet engines, where classical methods are no longer used due to a complex geometries and stricter requirements.

Keywords: Shot peening, closed-loop control, robotic manipulation, repeatability, flexibility, efficiency, process control, data acquisition, process history.