

DESENVOLVIMENTO DE MICROMOTORES PRODUZIDOS POR MICROMOLDAGEM DE PÓS POR INJEÇÃO (μ MPI)

DEVELOPMENT OF MICROMOTORS PRODUCED BY MICRO POWDER INJECTION MOLDING (μ PIM)

H. MOZETIC, W.C. RODRIGUES, L. SCHAEFFER

Universidade Federal do Rio Grande do Sul- UFRGS, Departamento de Metalurgia,
Laboratório de Transformação Mecânica – LdTM
Av. Bento Gonçalves, 9500 – Centro de Tecnologia – Porto Alegre – RS – Brasil
halston.mozetic@ufrgs.br, wilson.rodrigues@ufrgs.br
schaefer@ufrgs.br

RESUMO: Este trabalho tem como objetivo uma revisão sobre o desenvolvimento e fabricação de micro motores e sistemas micro eletromecânicos (MEMS) através da Micro Moldagem de Pós por Injeção (μ MPI). Este processo vem ganhando espaço paralelamente à micro-usinagem, pois é um processo que garante uma qualidade superior aos componentes, bem como um ganho de produtividade. As principais conclusões ratificam que ao longo das últimas décadas estes processos atuaram de forma conjunta à micro electrónica e no desenvolvimento de micro motores e outros sistemas que se beneficiam desta tecnologia. Exemplos práticos destes benefícios aparecem com grande força nos mercados internacionais. Os micro-sensores e micro-atuadores são utilizados em vários campos da indústria, principalmente automotiva. Outro campo importante desta tecnologia está ligado à área médica, onde componentes que necessitam alta complexidade se fazem necessários. Baseados nestas colocações é que mostraremos os progressos alcançados nesta área nos últimos anos.

Palavras-Chave: Micro Moldagem de Pós por Injeção (μ MPI); Micro Motores; Sistemas Micro Eletromecânicos (MEMS).

ABSTRACT: This paper aims to review on the development and manufacture of micro motors and micro electromechanical systems (MEMS) by Micro Injection Molding Powder (μ MPI). This process has gained importance in parallel to micro machining, since it is a process that guarantees a top quality components, as well as a gain in productivity. The main findings confirm that over the last decades these processes have worked jointly to develop micro-electronics and micro-motors and other systems that benefit from this technology. Practical examples of these benefits come with great force in markets around the world. The micro-sensors and micro-actuators are used in various fields of industry, especially automotive. Another important area of this technology is linked to the medical area, where components requiring high complexity are needed. Based on these placements is that we show progress in this area in recent years.

Keywords: Micro Powder Injection Molding (μ PIM), Micro Motors; Micro Electro Mechanical Systems (MEMS).

1. INTRODUÇÃO

A utilização da μ PIM, nos últimos anos vem ganhando um espaço cada vez maior, pois utiliza os mesmos conceitos da PIM tradicional que já é de domínio público. O grande objetivo deste processo está ligado à necessidade de explorarmos campos da ciência que já estão dominados e também aqueles que ainda não foram totalmente desbravados, como é o caso, principalmente, da área médica. A miniaturização trouxe muitas inovações devido a sua possibilidade, quase que elimi-

tada, de produzir componentes com vários materiais e design com um ganho significativo de produtividade [1].

As etapas de processamento básico na μ PIM são semelhantes aos PIM e estes envolvem a mistura do pó e uma pasta para produzir a matéria-prima para reproduzir as geometrias desejadas e posteriormente realizar o debinding, ou seja, retirar os componentes de aglutinamento com a posterior sinterização, obtendo-se finalmente as propriedades mecânicas finais [2].

Para a reprodução de muitos detalhes, as partículas finas são inferiores a $5\mu\text{m}$ e são misturadas com um multicomponentes. O sistema aglutinante, no caso do pó é essencial para evitar a oxidação durante o processamento [3]. Há requisitos adicionais para controle das propriedades para μPIM . Por exemplo, uma matéria-prima com baixa viscosidade é desejável, visto que, para preenchimento dos detalhes durante a moldagem deve ser realizada rapidamente, antes que a matéria-prima solidifique [4,5]. A moldagem por injeção PIM, têm condições que devem ser modificadas para a μPIM , por exemplo, a temperatura do molde superior [6,7] e uma menor velocidade de injeção [5]. Na fase final de debinding e sinterização, os componentes colocam novos desafios durante a densificação [8].

Qualquer efeito anisotrópico, por exemplo, a estrutura do grão se desenvolve de uma forma indesejável, afetando a qualidade do componente μPIM [9]. Um estudo anterior em um componente fabricado pela μPIM tem relatado valor de dureza diferente em locais, em particular, nas áreas onde existem diferentes dimensões [10]. No campo dos dispositivos eletro-mecânicos, há uma tendência importante para a integração com miniaturização e as várias funções modulares. Este movimento pode ser identificado através de termos como a “Mecatrônica e o MEMS (Micro-Electro Mechanical Systems)”. Entre os sistemas miniatura, que hoje são frequentemente classificados como micro e micro-sistemas, existe uma lacuna em dimensões e o processo de fabricação. No caso de MEMS baseado em ímãs permanente os processos habituais da PIM não podem ser utilizados, pois os resultados geram componentes frágeis e quebradiços, especialmente na espessura inferior a um milímetro. Assim eles não podem ser facilmente usinados, nem manipulados como uma peça separada do conjunto para uma futura integração com a estrutura final. Por isso, existe uma necessidade de filmes através do μPIM , com espessuras na faixa de micrómetros [1] para MEMS. A partir destas considerações, o projeto de MEMS tem-se explorado novas tecnologias para a produção de filmes através da μPIM .

As tecnologias, hoje utilizadas para fabricação de micro-motores, como a micro-usinagem ou o laser, ainda apresentam necessidades no que se refere a precisão, como por exemplo [11]:

- A grande variedade de funções da maioria dos dispositivos a serem feitos;
- A especificidade do ambiente em que eles vão operar;
- O melhor custo / desempenho para o alvo pedido;
- A necessidade de utilização de materiais específicos do componente para aperfeiçoar as funções e o desempenho de vários dispositivos;
- A necessidade de reduzir custos, escolha de materiais de baixo custo;
- A dificuldade de construir objetos em 3D continua a ser um desafio.

2. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE MICRO PEÇAS

Um dos grandes motivos, para o desenvolvimento de dispositivos miniaturizados, tem sido a busca por um processo que

torne sua produção competitiva, ou seja, o custo total do processo se torne viável. O processo convencional da Metalurgia do Pó, para fabricação de μEMS , esbarra num problema bem conhecido, pois os processos atuais deixam os componentes frágeis e quebradiços.

Quando falamos em micro motores e também sistemas mecânicos na ordem de 1 mm, este problema se torna ainda maior na faixa do micrómetro. Um dos processos bem conhecidos, que fornece uma boa reprodutibilidade de micro engrenagens, é a fundição a vácuo, também chamada de “Vacuum Casting”. Este processo caracteriza-se pela produção em massa de peças com cavidades complexas e de difícil usinabilidade por processos convencionais.

Uma vantagem deste processo é que permite sua utilização por vários tipos de materiais sem restrição de design. Observando a Figura 1, nela mostra-se o fluxo de processo para produção de micro engrenagens via “Vacuum Casting”.

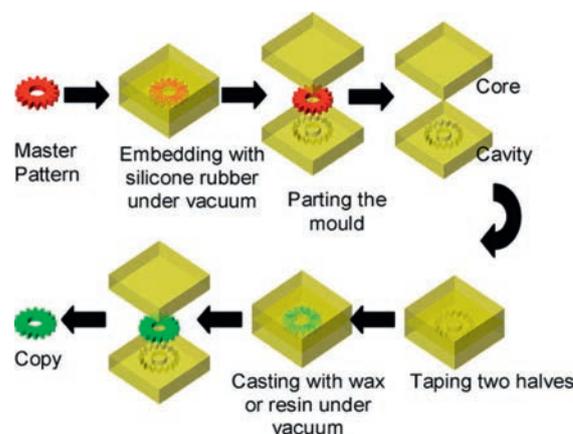


Fig. 1. Processo de “Vacuum Casting” [12].

Outro processo que trabalha com a Metalurgia do Pó (PM), quem vem sendo estudado, é a deposição de filmes em pó, com espessuras na ordem de $500\mu\text{m}$. O processo de serigrafia chamado de “Screen-Printing, possibilita a deposição de filmes muito finos em camadas de pó metálico. Isto, por exemplo, torna possível a construção de mini motores com núcleos magnéticos com espessuras variadas, conforme Figura 2.



Fig. 2. Micro-motor de passo com 10 mm de diâmetro [18].

No motor de passo, mostrado na Figura 2, existe uma deposição de pó de NdFeB com espessuras variando de 0.05 mm até 1mm com temperatura de cura em 120°C. Esta variação de espessura permite definir o torque que o micro motor desenvolvido poderá produzir, ou seja, definir qual a potência requerida pelo mecanismo a ser movimentado e também sua velocidade. A Figura 3, mostra as camadas de NdFeB, produzidas pelo processo “Screen-printing”.



Fig. 3. Camadas de NdFeB produzidas por “Screen-printing” [18].

A Figura 4, mostra as características construtivas do motor de passo do NdFeB, depositadas sobre um substrato de Fe-Si.

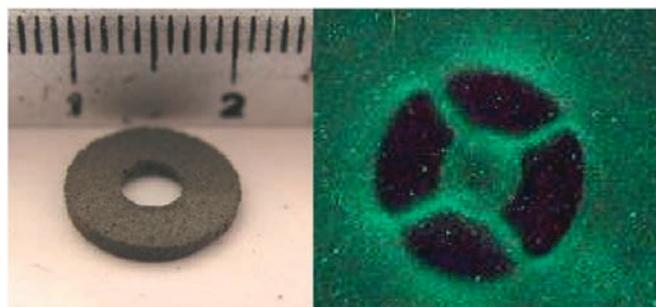


Fig. 4. Filme de NdFeB depositado por PM [18].

Como sabemos, existe uma grande quantidade de materiais disponíveis para o uso na meta μ PIM, mas a grande questão a ser levada em conta é o tamanho de partícula e o sistema aglutinante para um bom transporte dessas partículas. Os requisitos iniciais principais para uso na μ PIM são muito mais rigorosos do que a PIM convencional. O pó, por exemplo, deve ter sua dimensão na ordem de grandeza no mínimo igual ou menor que a cavidade a ser preenchida, a fim de obter o acabamento superficial desejado após a sinterização, para isso o comportamento deve ser isotrópico. Os materiais como o Aço Inoxidável 316L, PZT (Titanato Zirconato de Chumbo) e Alumina, são exemplos que atestam estes resultados. A Figura 5 mostra a morfologia destas matérias com tamanho de grão na ordem de $4\mu\text{m}$.

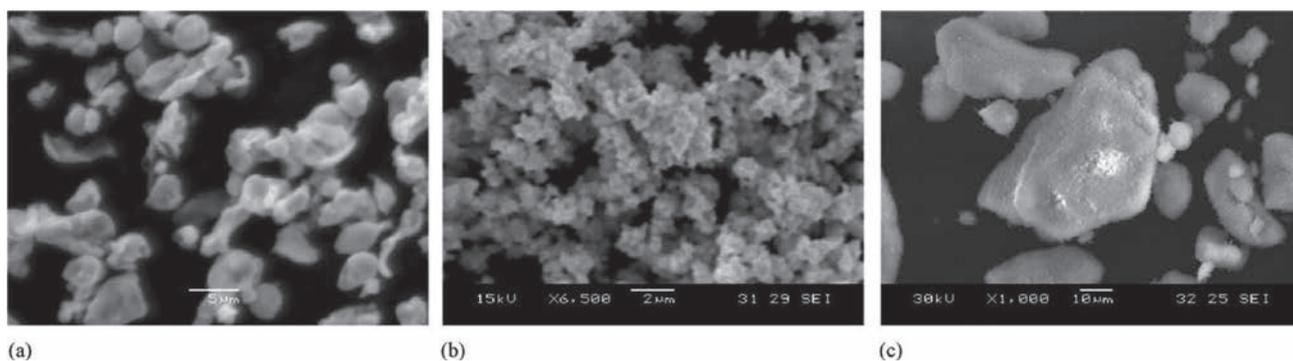


Fig. 5. (a) Aço 316L, (b) PZT e (c) Alumina; [13].

O desenvolvimento do produto passa obrigatoriamente pelo seu processo de fabricação e o benefício esperado em termos de funcionalidade também. Esta ideia de produção em nível industrial, passa pelas habilidades de engenharia. Logicamente, devemos levar em conta que o processo deve ter um custo aceitável, e isto tudo passa pela escolha dos melhores materiais a fim de se obter um desempenho com alta confiabilidade.

Várias soluções de design definem a arquitetura do produto e estabelecem qual o melhor processo com base nos requisitos de projeto. Também, produtos estão relacionados com o tipo de aplicação, como por exemplo, na área de TI (Tecnologia da Informação) e na área médica.

Os designs dos micros componentes têm que levar em conta, obrigatoriamente, o processo de fabricação, isto devido às limitações existentes, ou seja, as tecnologias como micro usinagem, laser entre outras, ainda, por menor que seja, removem alguma quantidade de material. Considerando estas

observações, μ PIM é a melhor solução para o processo de produção em escala, vide a produção na área da engenharia micro electrónica.

A manipulação destes produtos torna-se cada vez mais um grande desafio na área dos micro-componentes, visto que o nível de integração exigida é muito maior do que em um produto convencional.

De uma forma geral os micros componentes devem atender os seguintes pontos [14]:

1. Design para a funcionalidade;
2. Design para produção em escala;
3. Design para custo mínimo de produção;
4. Design para a testabilidade;
5. Design para atender as questões ambientais.

A Figura 6, mostra uma engrenagem produzida pela μ PIM com o material Aço 316L com um diâmetro de 1mm sendo

injetada no molde com temperatura de 55°C à temperatura de 180°C.

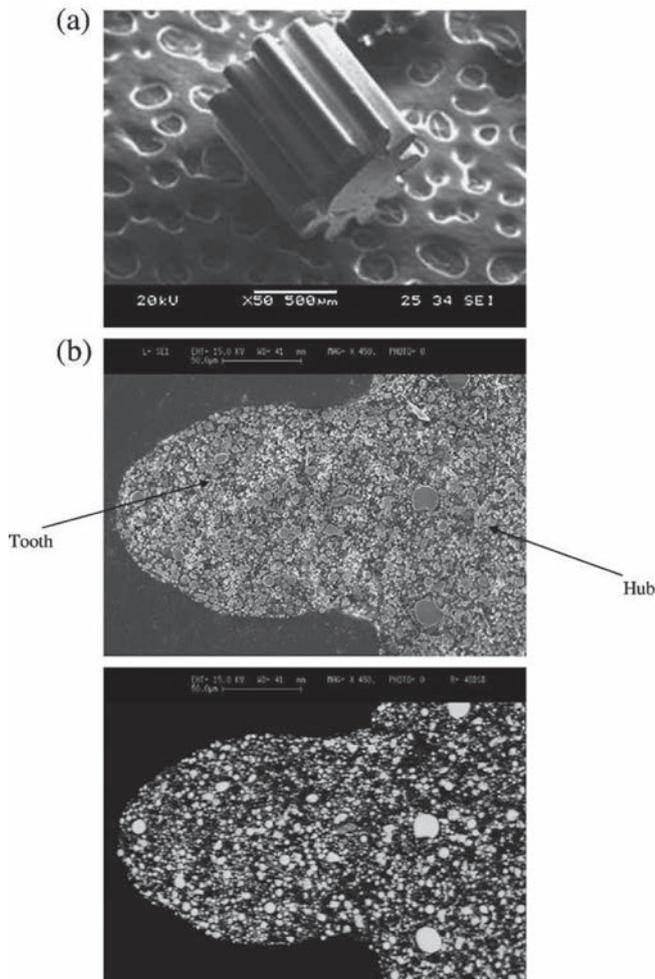


Fig. 6. (a) Micro engrenagem, (b) Distribuição do Pó, centro e periferia do dente; [15].

Outro processo também importante, desenvolvido nos anos 80, é o LIGA de origem alemã, *Lithographie, Galvanoformung, Abformung* (*Lithography Electroplating and Molding*), mostrado na Figura 7, que utiliza como base o conhecimento sobre a fotolitografia UV.

É um processo de micro fabricação combinando Litografia de raios-X, através de uma máscara de moldagem que permite a fabricação de micro peças com alta precisão podendo variar milhares de micrômetros de espessura. As áreas da micro mecânica e da micro ótica, são as que mais se beneficiam desta tecnologia.

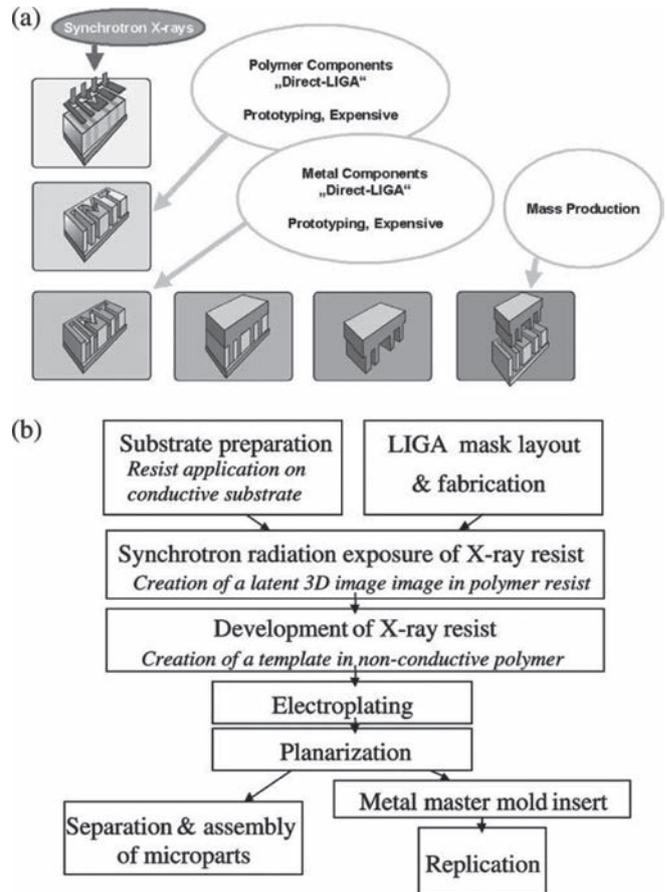


Fig. 7. (a) Processo LIGA, (b) Sequência do processo LIGA; [16].

3. PROCESSO DE FABRICAÇÃO – μPIM

O processo PIM tem a capacidade de produzir peças com dimensões muito reduzidas, com geometrias bastante complexas no seu design final e não tem a necessidade de utilização de outro processo subsequente, tornando a fabricação economicamente viável. Contudo, quando a mudança do processo se faz necessário, o método de fabricação deve ser considerado antes de uma possível troca do material, evitando-se custos de desenvolvimentos desnecessários para o fabricante.

No processo MPI, as peças são manufaturadas utilizando-se o material na forma de pó. O pó é misturado com vários tipos de polímeros, dependendo do material base que será injetado no molde, para que no final da injeção obtenha-se o design desejado. Na sequência os polímeros são retirados e na etapa

seguinte o componente é sinterizado, conferindo-se, assim, as propriedades finais desejadas para a peça.

Esta é uma técnica muito complexa e são muitas as condições de contorno durante todo processamento, portanto, a compreensão do comportamento dos materiais em todas as etapas do processo da PIM é fundamental.

Etapas:

1. Homogeneização ou mistura do pó com o ligante (também chamado de aglutinante) formando a carga injetável.
2. Injeções da carga dentro do molde (que pode ser com alta pressão ou baixa pressão). Resultado é a peça verde.
3. Remoções do ligante ou sistema aglutinante (que pode ser química, térmica ou ambas). Resultado é a peça marrom.
4. Sinterização para a consolidação da peça ate sua densidade e dureza final.

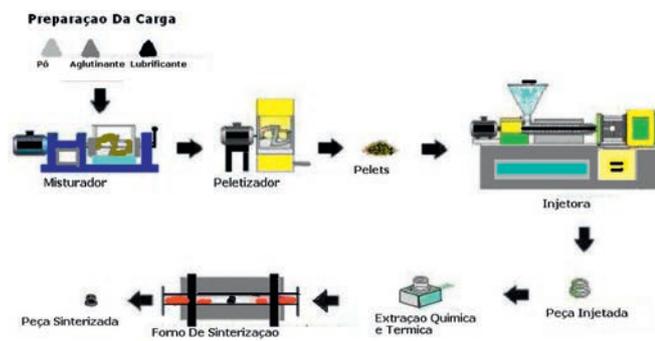


Fig. 8. Sequência do Processo de Fabricação MPI

O MPI, como processo, se diferencia dos demais processos pelas seguintes características:

- Utiliza pós metálicos e não-metálicos como matérias-primas;
- Processo metalúrgico que vem se desenvolvendo muito ultimamente que permite fabricação de peças metálicas e não metálicas e cerâmicas;
- Fabricação de peças com características estruturais e físicas difíceis de serem obtidas por outro processo metalúrgico;
- Facilidade na produção de peças em grande escala, tornando o processo vantajoso;
- Permite utilização de matérias recicláveis a fim de minimizar os impactos ambientais e racionalizar a utilização das cadeias energéticas;
- Concentra-se na produção de peças de pequenas dimensões;
- Permite a produção de peças com as mais variadas formas das mais fáceis as mais complicadas com alta complexidade geométrica com mesmo grau de dificuldade;
- As peças produzidas saem com formas praticamente definitivas exigindo nenhum retrabalho ou muitas vezes o mínimo de retrabalho para acabamento posterior como usinagem e apresentam um ótimo acabamento superficial causando uma economia de material ao extremo;
- Permite também a produção de peças com tolerâncias bastante apertadas e com características estruturais e físicas impossíveis de serem obtidas através de outro processo metalúrgico;

- Caracteriza-se por uma ausência de fase líquida ou presença apenas parcial de uma fase líquida durante o processamento;
- Permite um alto controle da composição química desejada no produto final;
- É um processo que permite alto grau de isotropia estrutural;
- As peças produzidas por metalurgia do pó podem ser aplicadas em todos os ramos da indústria como automobilística, informática, aeroespacial, têxtil, implementos agrícolas, etc.;
- São também muito utilizados na área médica como implantes odontológicos, cirúrgicos e equipamentos médicos. (implantes ósseos, brackets ortodônticos, componentes de instrumentos cirúrgicos);
- É um processo de fácil automação e que vem se desenvolvendo numa taxa crescente pela indústria;

Quando tratamos de micro injeção, estas considerações também são válidas, ainda mais, por se tratar de peças com dimensões extremamente pequenas e com detalhes e tolerâncias muito rigorosas. A Figura 8 e Figura 9 mostram o Aço 316L micro injetado nas diversas etapas de sua produção.

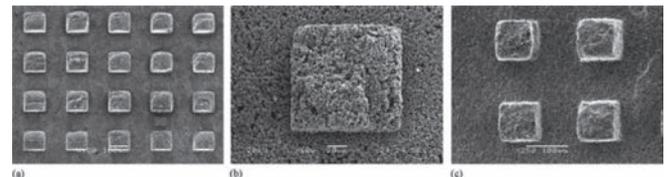


Fig. 9. (a) peça verde 100µm, (b) peça marrom 20µm e (c) sinterizada 100µm; [17]

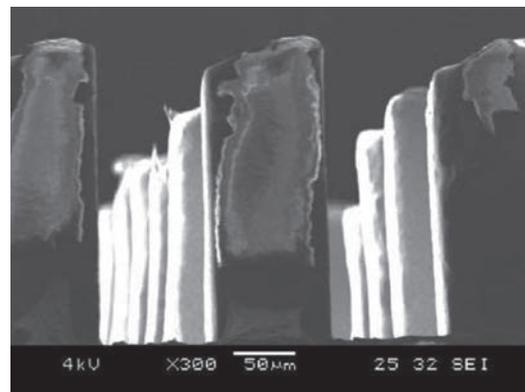


Fig. 10. Peça vista em profundidade 316L 50µm[17]

4. CONCLUSÃO

Como podemos observar os processos para construção de microcomponentes são variados, na sua maioria apresentam dificuldades para conferir às peças as propriedades desejadas. O μ MPI tem estudado, exaustivamente, com vistas a obter-se uma maior abrangência na produção contínua de peças, ou seja, estão aumentando a capacidade dos equipamentos, e também sua possibilidade de produzir dispositivos cada vez menores, inclusive na faixa nanométrica.

REFERÊNCIAS

- [1] J. Fleischer, A.M. Dieckmann, Automation of the powder injection molding process *Microsyst. Technol.* 12 (2006) 702-706.
- [2] R.M. German, A. Bose, *Injection Molding of Metals and Ceramics*, MPIF, Princeton, NJ, 1997.
- [3] R. Zauner, *Micro Powder Injection Moulding*, *Microelectron. Eng.* 83 (2006) 1442-1444.
- [4] Z.Y. Liu, N.H. Loh, S.B. Tor, K.A. Khor, Y. Murakoshi, R. Maeda, Binder system for micropowder injection molding, *Mater. Lett.* 48 (2001) 31-38.
- [5] Z.Y. Liu, N.H. Loh, S.B. Tor, K.A. Khor, Y. Murakoshi, R. Maeda, T. Shimizu, Micro powder injection molding, *J. Mater. Proc. Technol.* 127 (2002) 165-168.
- [6,7] G. Fu, N.H. Loh, S.B. Tor, B.Y. Tay, Y. Murakoshi, R. Maeda, Injection moulding, debinding and sintering of 316L stainless steel microstructures, *Appl Phys A* 81 (2005) 495-500.
- [8] L. Liu, N.H. Loh, B.Y. Tay, S.B. Tor, Y. Murakoshi, R. Maeda, Densification and grain growth of stainless steel microsize structures fabricated by μ MIM, *Appl. Phys. A* 83 (2006) 31-36.
- [9] M. Auhorn, T. Beck, V. Schulze, D. Löhe, Determination of mechanical properties of slip cast, micro powder injection moulded and microcast high aspect ratio microspecimens, *Microsyst. Technol.* 10 (2004) 489-492.
- [10] B.Y. Tay, L. Liu, N.H. Loh, S.B. Tor, Y. Murakoshi, R. Maeda, Characterisation of metallic micro rod arrays fabricated by μ MIM, *Mater. Charact.* 57 (2006) 80-85.
- [11] Chantal Khan Maleka, Volker Saileb, Applications of LIGA technology to precision manufacturing of high-aspect-ratio micro-components and systems: a review, *Microelectronics Journal* 35 (2004) 131-143; October 2003.
- [12] Y. Tang, W.K. Tan, J.Y.H. Fuh, H.T. Loh, Y.S. Wong, S.C.H. Thian, L. Lu, Micro-mould fabrication for a micro-gear via vacuum casting, *Journal of Materials Processing Technology* 192-193 (2007) 334-339.
- [13] Z.Y. Liua, N.H. Loha, S.B. Tora, K.A. Khora, Y. Murakoshi, R. Maedab, T. Shimizu, Micro-powder injection molding, *Journal of Materials Processing Technology* 127 (2002) 165-168.
- [14] L. Alting, F. Kimura, H.N. Hansen, G. Bissacco, *CIRP, Annals – Manufacturing Technology* 52 (2003) 635-657.
- [15] B.Y. Tay, N.H. Loh, S.B. Tor, F.L. Ng, G. Fub, X.H. Lu., Characterisation of micro gears produced by micro powder injection moulding, *Powder Technology* 188 (2009) 179-182.
- [16] Chantal Khan Maleka, Volker Saileb, Applications of LIGA technology to precision manufacturing of high-aspect-ratio micro-components and-systems: a review *Microelectronics Journal* 35 (2004) 131-143; October 2003.
- [17] Z.Y. Liua, N.H. Loha, S.B. Tora, K.A. Khora, Y. Murakoshi, R. Maedab, T. Shimizu, Micro-powder injection molding, *Journal of Materials Processing Technology* 127 (2002) 165-168.
- [18] Thanassis Speliotisa, Dimitris Niarchosa, Patrick Meneroudb, G. Magnac, Franck Claeysseb, John Pepinc, Claude Fermond, M. Pannetierd, N. Biziered, Micro-motor with screen-printed rotor magnets; *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 316 (2007) e 120 e 123.