

EFEITO DO TRATAMENTO TERMICO T6 NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DA LIGA $Al3Si2,5Cu$ TIXOJORJADA

Facchini, Christiano Araujo

Zoqui, Eugênio José

Departamento de Engenharia de Fabricação – Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Caixa Postal 6122, Campinas, CEP 13083-860, SP, Brasil.

euchri@yahoo.com.br, zoqui@fem.unicamp.br

Gregolin, Alexandre

Departamento de Engenharia de Fabricação – Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Caixa Postal 6122, Campinas, CEP 13083-860, SP, Brasil.

Gregolin.alexandre@gmail.com

Resumo. Este trabalho apresenta os resultados comparativos das propriedades mecânicas de microdureza, tração e limite de resistência a fadiga da liga de alumínio $Al-3wt\%Si-2,5wt\%Cu$, ou simplesmente $Al3Si2,5Cu$, nas condições, como fundida, tixoforjada, (com fusão parcial controlada), e posterior tratamento térmico T6. Para isso a liga em estudo foi fabricada utilizando técnicas que permitiram o refino e a globularização de sua microestrutura para facilitar o processo de tixoforjamento, através do uso do refino de grão com a imposição de agitação eletromagnética durante a solidificação. O posterior tixoforjamento foi executado em uma prensa pneumática de 12 toneladas, após reaquecimento do material à temperatura de $616\text{ }^{\circ}\text{C}$ com manutenção neste patamar por cerca de 30s utilizando-se um forno indutivo. Esta temperatura corresponde à fração líquida de cerca de 55% segundo o software de simulação termodinâmica Thermo-Calc[®]. As peças tixoforjadas foram analisadas em termos microestruturais e mecânicos nas condições como tixoforjada e após tratamento térmico de solubilização e envelhecimento artificial T6. A microdureza é praticamente dobrada após T6 passando de 59HV para 127HV, a resistência em tração em termos de tensão de escoamento (σ_y) e limite de ruptura (σ_r) passa de 114 a 257 e 171 para 294 MPa respectivamente com alongamento (ϵ) diminuindo de 3,4 para 2,8. O limite de fadiga (S_e) passa de 64 a 78 MPa. Ficando evidenciada a importância do T6 para a melhoria das propriedades mecânicas de peças tixoconformadas neste material.

Palavras chave: Tixoforjamento, liga de alumínio $Al-3wt\%Si-2,5wt\%Cu$, T6, propriedades mecânicas, fadiga.

1. INTRODUÇÃO

Em uma parte expressiva das aplicações da engenharia os componentes estão sujeitos as cargas dinâmicas que influenciam negativamente em seu tempo de serviço, sendo assim, faz-se indispensável o estudo da vida em fadiga dos materiais de engenharia. Tendo em vista os avanços tecnológicos relacionados aos processos de fabricação dos materiais metálicos o tixoforjamento se destaca, comparativamente aos processos convencionais, no sentido de requerer menor número de etapas e menor energia, conferindo ao produto final, *near net-shap*, boas propriedades mecânicas, aumentando ainda o tempo de vida do ferramental de conformação (Atkinson, 2005). Além disso, pode-se trabalhar uma extensa quantidade de ligas metálicas que podem receber posterior tratamento térmico. Por este motivo este estudo se concentra em comparar as propriedades mecânicas de microdureza, tração e limite de resistência a fadiga da liga de alumínio $Al-3wt\%Si-2,5wt\%Cu$ nas condições tixoforjada em matriz fechada com e sem o tratamento térmico de solubilização e envelhecimento artificial T6. Para isso a liga foi fabricada utilizando refino químico de grão, desgaseificação e solidificação sob influência de agitação eletromagnética em uma matriz refrigerada a água. Posteriormente os lingotes fabricados foram tixoconformados pelo processo de tixoforjamento em prensa pneumática de 12 ton em uma matriz fechada e temperatura controlada. Do material tixoforjado foram separadas 50% das amostras para o tratamento térmico T6 e posteriormente foram feitas em cada uma das condições, as metalografias e os ensaios de microdureza, tração e fadiga. Sabendo que as ligas tixoforjadas apresentaram semelhança em sua microestrutura como o tamanho de grão e glóbulos, e tendo em vista que a porosidade é o principal fator de influência negativa na vida em fadiga do material (Mendes, 2018), durante o processo de fabricação foram tomados alguns cuidados para a redução da quantidade de gases na matéria prima e controle da temperatura.

O presente trabalho pretende subsidiar os engenheiros e projetistas quanto ao conhecimento detalhado das propriedades mecânicas da liga de alumínio $Al-3wt\%Si-2,5wt\%Cu$, ou simplesmente $Al3Si2,5Cu$, nas condições tixoforjadas e tratada termicamente T6.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O desenvolvimento experimental deste trabalho foi realizado nos Laboratórios de Processos Metalúrgicos de Fabricação do Departamento de Engenharia de Manufatura e Materiais (DEMM) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) UNICAMP em conjunto com o laboratório de ensaios mecânicos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - Campus São João da Boa Vista (IFSP-SBV). Os trabalhos foram iniciados com a fabricação da matéria prima via balanço de massa previamente definido. Foram fabricados 5 kg de matéria prima que foram lingotados em tarugos com diâmetro de 30mm por 150mm de comprimento perfazendo um total de 13 lingotes. Estes lingotes foram produzidos a partir do material liquefeito em um forno do tipo poço resistivo a uma temperatura de aproximadamente 750°C utilizando cadinhos de carbetto de silício com sua parte interna revestida de cimento a base de fibra cerâmica Sílico Aluminiçosa (QF180). Após o material estar fundido foi adicionado refinador de grãos (Al-5wt%Ti-1wt%B) numa proporção de 4% em massa, conforme trabalho anteriormente (Lourençato, 2008 e Torres, 2013), objetivando além do refino de grão a globularização da microestrutura. O material fundido foi posteriormente vazado em uma lingoteira refrigerada a água com uma vazão de 38 l/min sob a influência de um campo magnético com potência aproximada de 8000 W / 10 Gauss a temperatura de 685 °C, 50°C acima da temperatura liquidus, temperatura determinada por simulação numérica através do software Thermo-Calc®.

De posse da matéria prima fabricada foram selecionados três lingotes que passaram por uma análise da composição química e metalográfica. Para a realização das análises foram cortadas as extremidades de cada um dos lingotes selecionados e cada amostra foi lixada com lixas d'água de granulometria 220, 320, 400 e 600 mesh e analisada em um espectrômetro de emissão ótica da marca Anacom Cientifica, modelo Bill-Oes. As análises químicas foram repetidas três vezes em cada amostra perfazendo o total de 9 medidas e os valores médios obtidos podem ser observadas na tabela 1.

Tabela 1. Composição química obtida através de espectrômetros de Emissão Óptica (em wt% peso).

	Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ti	Ni	Al
Média	2,48	2,818	0,08	0,018	0,173	0,058	0,1832	0,018	Balanço
Desvio	0,17	0,088	0,002	0,004	0,011	0,002	0,0142	0,002	

Posteriormente a fabricação dos lingotes, cada um deles foi dividido ao meio perfazendo um total de 26 pequenos lingotes com dimensões de 30mm de diâmetro por 75mm de comprimento, esta divisão dos lingotes fez-se necessária para o posicionamento na matriz de tixoforjamento que possui as dimensões de 80mm x 53mm x 25mm.

O tixoforjamento da liga foi realizado após reaquecimento destes lingotes à temperatura de 616 °C com manutenção neste patamar por cerca de 30s utilizando-se um forno indutivo Norax de 20 kW 8 kHz e uma prensa pneumática de 12 ton. Esta temperatura corresponde à fração líquida de cerca de 55% segundo o software de simulação numérica Thermo-Calc®. A fusão parcial controlada (FPC) que consiste no reaquecimento controlado do lingote até a temperatura correspondente a fração líquida desejada e permanência por um determinado período nesta temperatura ativa os mecanismos de globularização da microestrutura o que confere ao material o comportamento reológico desejado para a execução do processo de tixoforjamento.

Foram tixoforjados 13 lingotes como apresenta a figura 1. Destes treze lingotes fabricados foi descartado o lingote de número 3 por apresentar defeito de preenchimento totalizando 12 lingotes que foram divididos ao meio ficando 6 lingotes para ensaios sem o tratamento térmico e seis lingotes para ensaio após o tratamento térmico T6.

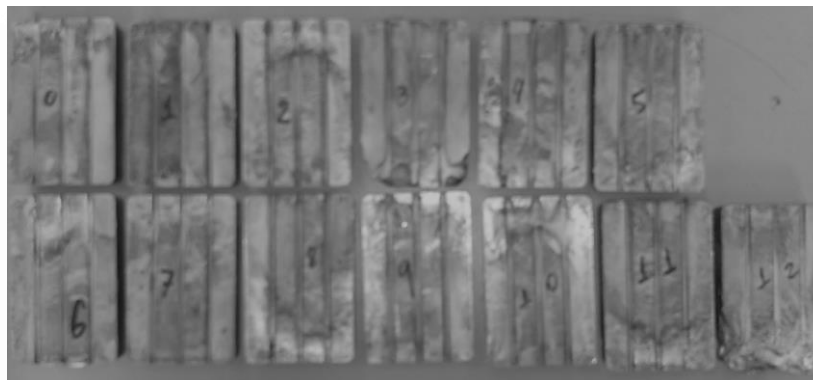


Figura 1. Matéria prima tixoconformada.

Cada lingote foi cortado no sentido longitudinal conforme a marcação da própria matriz e de cada um dos lingotes pode-se retirar quatro peças. Para a análise metalográfica separou-se 2 peças, outras 4 peças foram separadas para o

ensaio de tração e 16 peças para ensaio de fadiga. O tratamento térmico T6 foi realizado após estudo da melhor condição de dureza atingida para a temperatura de solubilização de 515°C e envelhecimento artificial a temperatura de 180°C. O equipamento utilizado para o tratamento térmico foi um forno do tipo mufla da marca ZEZIMAQ®.

Posteriormente ao tratamento térmico as peças tratadas e as peças não tratadas foram devidamente separadas, usinadas e preparadas para o ensaio de tração que foi realizado em uma máquina de ensaios da marca Instron® modelo 8801 com capacidade de 100 kN e o ensaio de fadiga, que foi realizado em uma máquina de flexão rotativa da marca Fathigue Dynamics inc. modelo RBF-200.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A caracterização da microestrutura foi realizada através do uso da metalografia convencional, com o objetivo de evidenciar os principais precipitados responsáveis pelo ancoramento da movimentação de discordâncias, a saber o silício e o CuAl_3 , responsáveis maiores pelo comportamento mecânico. A metalografia convencional, mostrada na Figura 2, permite a avaliação destes precipitados, sua distribuição e sua morfologia e foi realizada para o material nas condições: como fundida (a); tixoforjada (b), após fusão parcial controlada durante 30, mas sem tratamento térmico e tixoforjada (c), com posterior tratamento térmico T6. A figura 2.a apresenta uma estrutura bastante fragmentada tendendo ao formato de pequenas rosetas, esta morfologia é promovida pelo campo magnético e a alta taxa de resfriamento durante a solidificação, fato que promove a quebra das dendritas que dão origem a grãos pequenos que tendem a um formato globularizado, o que não ocorre em um fundido solidificado em condições convencionais.

Na figura 2b) pode-se notar a evolução da estrutura fundida que por meio da fusão parcial controlada (FPC) por um período de trinta segundos promoveu os mecanismos que permitiram a globularização dos grãos. Na liga tratada apresentada pela figura 2c nota-se a modificação na fase eutética devida ao tratamento térmico T6, fato visível, porém não determinante na dureza uma vez que esta é alcançada pela nucleação de pequenos precipitados de ordem nanométrica no interior da fase alfa.

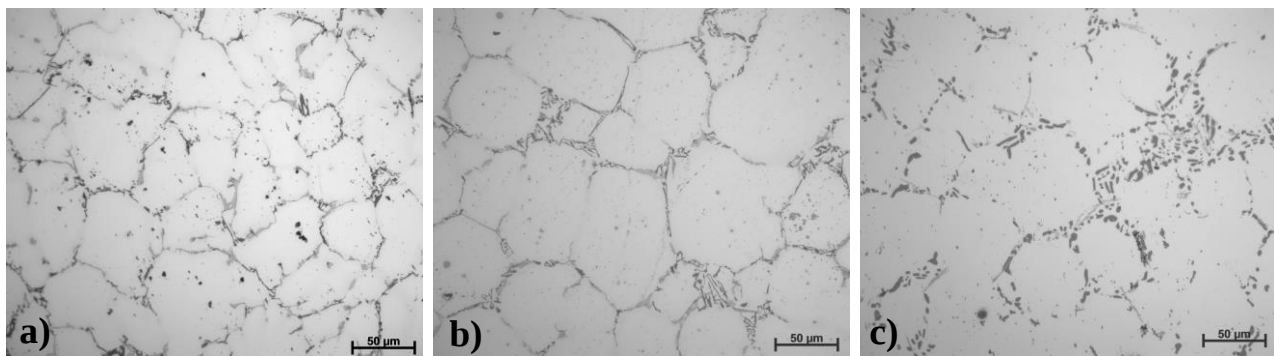


Figura 2. Micrografia da liga $\text{Al}_3\text{Si}_{2,5}\text{Cu}$ como (a) fundida, (b) tixoforjada e (c) tixoforjada e tratada termicamente T6

Nota-se primeiramente que há um ligeiro aumento do tamanho médio da fase primária α , em função do tixoforjamento e que o Silício, de coloração preta ou cinza escuro, assim como o CuAl_3 , de coloração cinza claro, estão presentes majoritariamente no contorno da fase primária. Nas amostras como fundida (a) e tixoforjada (b) o silício se apresenta com morfologia acicular que é deletéria para o comportamento mecânico, mas há forte globularização após o tratamento térmico T6, o que deverá melhorar este quesito. O CuAl_3 apresenta-se na forma de pequenos glóbulos em todas as condições sendo que para as condições fundida e tixoforjada há a presença deste precipitado em um formato também acicular junto ao contorno da fase primária.

O tratamento térmico da liga foi realizado na metade das peças tixoforjadas e as peças tratadas alcançaram dureza significativamente maior que as peças não tratadas. A tabela 2 apresenta os valores de microdureza HV com carga de 0,1 Kg, aplicada por um período de 15 segundos, em cada uma das condições. Para este ensaio foram feitas 8 medidas em cada condição fabricada das quais foram calculadas a média e o desvio padrão. Observa-se na tabela 2 que a liga $\text{Al}-3\text{wt}\%\text{Si}-2,5\text{wt}\%\text{Cu}$ fundida possui dureza superior a condição Tixoforjada e que o tratamento térmico T6 na condição Tixoforjada aumenta em 116% a dureza da liga.

Tabela 2. Microdureza em cada uma das condições fabricadas

	Fundido	Tixoforjado	Tixoforjado-T6
$\text{Al}_3\text{Si}_{2,5}\text{Cu}$	76 ± 6	59 ± 5	127 ± 5

Para o ensaio de tração foram usinados quatro corpos de prova conforme a norma ASTM E8/E8M-16a 2017 para cada uma das condições fabricadas. A tabela 3 apresenta as médias dos quatro ensaios de tração realizados em cada uma das condições fabricada onde σ_y corresponde a tensão de escoamento, σ_r corresponde tensão limite de resistência à tração e ε o alongamento. Dos resultados apresentados observa-se que a tensão de escoamento (σ_y) apresentou resultado

similar entre as condições fundidas e tixoforjada, mas aumento significativo, na ordem de 143 MPa, para a liga na condição tixoforjada com T6, ou seja, um aumento da ordem de 125%. No limite de resistência a tração (σ_r) da liga tixoforjada com T6 comparada a liga na condição tixoforjada nota-se um aumento da ordem de 123 MPa, ou seja, 72% de aumento, já o alongamento é prejudicado diminuindo de 4,3 para 2,8, ou um percentual de 0,61%. Isto pode ser explicado pela morfologia e distribuição dos microprecipitados: enquanto o silício permanece no contorno da fase primária num formato acicular nas condições fundida e tixoforjada, o mesmo está bem distribuído e em uma forma globular no estado tratado termicamente.

Tabela 3. Resultados dos ensaios de tração em cada condição testada.

Amostras	σ_y (0,2%) (MPa)	σ_r (MPa)	ε (%)
Fundida	105	206	4,3
Tixoforjada	114	171	3,4
Tioforjada-T6	257	294	2,8

Para o ensaio de fadiga os corpos de prova foram preparados seguindo as recomendações dimensionais e de acabamento superficial orientadas pelo fabricante do equipamento utilizado para o ensaio conforme seu manual de utilização. Segundo Pessoa et al (2016) o acabamento superficial do componente solicitado a cargas dinâmicas influencia principalmente em sua resistência a fadiga. Para estes ensaios adotou-se utilizar o método escada que permite avaliar o limite de resistência a fadiga (Se) sem a necessidade de se levantar a curva tensão-número de ciclos (S-N) que demanda número significativo de corpos de prova. Cada corpo de prova foi submetido a uma carga e ensaiado até que o mesmo falhasse ou atingisse 10^7 ciclos, quando o corpo de prova falhava diminuía-se a carga em um incremento fixo igual a 10 MPa e quando o corpo de prova atingia a ciclagem de 10^7 aumentava-se o carregamento no mesmo incremento fixo, alternadamente. Desta forma por regressão estatística é possível estimar o limite de fadiga (Se) e seu desvio padrão assim como o grau de incerteza da medição (IM).

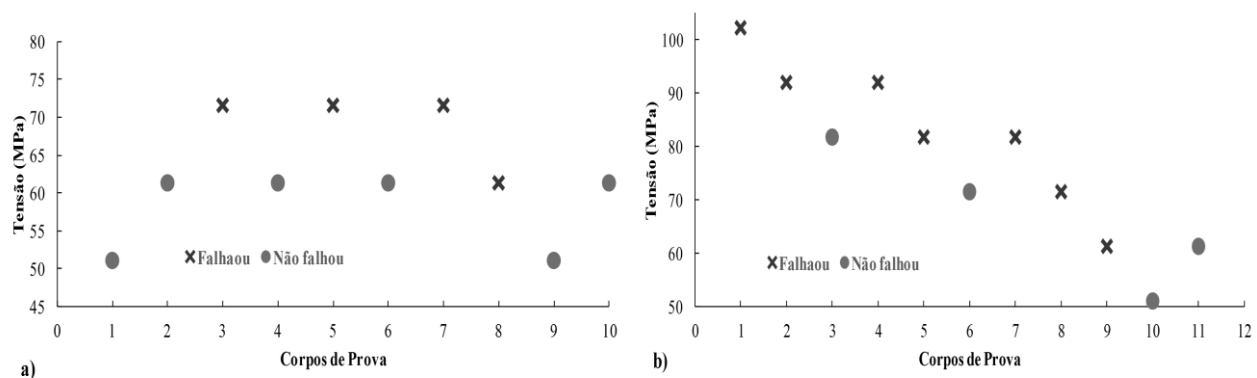


Figura 3. Ensaios de fadiga realizados na liga tixoforjada (a) e na liga tixoforjada com tratamento térmico T6 (b).

Foram realizados dez ensaios para a liga tixoconformada como ilustra a figura 1a e onze ensaios para a liga tixoconformada com tratamento térmico T6 como ilustrado na figura 1b, os resultados calculados dos ensaios estão apresentados na tabela 4 e apresenta os valores médios de resistência a fadiga. Nota-se um bom aumento neste comportamento que também pode ser relacionado, especialmente a distribuição e a morfologia das partículas de silício.

Tabela 4. Resultado dos ensaios de fadiga em termos de limite de fadiga (Se) e incerteza da medição (IM).

Amostras	Se (MPa)	IM
Tixoforjada	$64 \pm 5,4$	5,4
Tixoforjada-T6	$78 \pm 5,4$	5,4

Dos resultados anteriormente expostos observa-se para a liga Al3Si2,5Cu nas condições tixoforjada e tixoforjada com tratamento térmico T6 um aumento significativo na dureza, na tensão limite de escoamento σ_y e na tensão limite de resistência σ_r , no entanto houve uma queda no alongamento devido a diminuição da ductilidade da liga tratada termicamente. Já no limite de resistência a fadiga foi notado um aumento de aproximadamente 18%.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer às agências brasileiras de fomento à pesquisa (FAPESP), ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - PQ 304921 / 2017-3) e ao FAPESP (Programa de Pós-

Graduação em Pesquisa do Estado de São Paulo - Projeto 2015 / 22143-3). CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Código Financeiro 001) por fornecer suporte financeiro para este estudo.

5. REFERÊNCIAS

- Atkinson, H.V., 2005, "Modeling the Semi-solid Processing of Metallic Alloys", Progress in Materials Science, Vol. 50, pp. 341-412.
- Camacho, A. Maciel, Atkinson, H.V., Kapranos, P., Argent, B.B., 2003, "Thermodynamic predictions of wrought alloy compositions amenable to semi-solid processing", Acta Materialia, Vol. 51, Issue 8, pp. 2319-2330.
- Lourençato, L.A., 2008, "Tixofornabilidade e Tixoforjamento de Ligas Al-Xwt%Si-0,5wt%Mg em Prensa Excêntrica com Matriz Aberta", Tese Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Mendez, V. T. U., 2018, "Comportamento em fadiga da liga A356 tixoforjada", dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Pessoa, d., grigorescu, a., herwig, p., wetzig, a., zimmermann, m. Influence of notch effects created by laser cutting process on fatigue behavior of metastable austenitic stainless steel. Xviii international colloquium on mechanical fatigue of metals (icmf xviii), 2016.
- Torres, L.V., 2013, "Tixoconformação de Novas Ligas Al-Si-Cu", Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

"Nós os autores somos os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho".

EFFECT OF HEAT TREATMENT T6 IN THE MECHANICAL BEHAVIOR OF THE Al-3wt%Si-2,5wt%Cu ALLOY THIXOFORMED

Facchini, Christiano Araujo

Zoqui, Eugênio José

Departamento de Engenharia de Fabricação – Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Caixa Postal 6122, Campinas, CEP 13083-860, SP, Brasil.

euchri@yahoo.com.br, zoqui@fem.unicamp.br

Gregolin, Alexandre

Departamento de Engenharia de Fabricação – Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Caixa Postal 6122, Campinas, CEP 13083-860, SP, Brasil.

Gregolin.alexandre@gmail.com

Abstract. This work presents the comparative results of the mechanical properties of microhardness, tensile strength and fatigue strength of aluminum alloy Al-3wt%Si-2.5wt Cu under the conditions, as-cast, thixoforged, (with controlled partial melting), and subsequent heat treatment T6. For this, the alloy under study was manufactured using techniques that allowed the refining and globularization of its microstructure to facilitate the thixoforging process, through the use of grain refining with the imposition of electromagnetic stirring during solidification. The subsequent thixoforging was performed in a 12 ton pneumatic press after reheating the material at temperature of 616 °C with maintenance at this stage for about 30 s using an inductive furnace. This temperature corresponds to the liquid fraction of about 55% according to Thermo-Calc® thermodynamic simulation software. The thixoforged part were analyzed in microstructural and mechanical terms in the conditions as thixoforged and after heat treatment of solubilization and artificial aging T6. The microhardness was practically doubled after T6 from 59HV to 127HV, the tensile strength in terms of yield stress (σ_y) and rupture limit (σ_r) goes from 114 to 257 and 171 to 294 MPa respectively with decreasing elongation (ϵ) from 3.4 to 2.8. The fatigue limit (S_e) increases from 64 to 78 MPa. It was evidenced the importance of T6 for the improvement of the mechanical properties of thixoforged parts in this material.

Keywords: Thixoforged, alloy AL-3WT%SI-2,5WT%CU, fatigue

RESPONSIBILITY NOTICE

"We the authors are the only responsible for the content of this paper."