溶接学会誌第59巻(1990)第6号421
宇宙溶接について
増渕興一
Welding in Space
by Koichi Masubuchi
キーワード:宇宙溶接,宇宙ステーション,宇宙基地,遠隔溶接,無人
溶接
1.まえがき
今回溶接学会の第57期通常総会において推薦会員に
選ばれ,引き続いて開催された春季全国大会において宇
宙溶接について特別講演をする機会を得ましたことは小
生にとりまして誠に光栄に存ずることであります.この
原稿は特別講演の内容を主体と1して取りまとめたもので
あります.
私が初めて渡米しましたのは1958年(昭和33年)の
ことで,1968年以来マサチューセッツ工科大学(Massa
-chusetts Institute of Technology)の海洋工学科
(Department of Ocean Engineering)で材料及び建造
法の講座を担当しております.また材料理工学科
(Department of Materials Sceince and Engineering)
の教授も兼任しております.
宇宙溶接の現状を一言で表現すれば 「夜明け前,それ
もまだ真っ暗の夜空の東の方がかすかに白くなって来た
時 」 のようなものであり,今後どのように事態が展開し
て行くのかは誰にもわからない.1990年代には現在計画
されている宇宙ステーションが打ち上げられるであろう
し,その後は更に大きな宇宙構造物が建造されることに
なるであろう.そうすれば溶接などこれらの建造物を建
造したり修理したりする技術そしてその研究もどうして
も必要となり,本文では現在までにわかっている限られ
た知識について述べるだけでなく,宇宙溶接に関連した
技術の発展の動向を述べる.
2.宇宙開発と溶接技術
宇宙溶接について述べる前に宇宙開発,特に米国にお
ける宇宙開発の概要を溶接技術に関連したことに重点を
置いて述べる(表1参照).
宇宙開発の始まり.宇宙開発が広く一般社会の人達に
とって現実のものとなったのは,1957年にソ連が最初の
人工衛星スプートニック1号を打ち上げた時からであ
る.翌1958年には米国も第1号人工衛星エクスプローラ
1号を打ち上げ,従来からあった国立航空諮問委員会
(National Advisory Committee for Aeronautics)を
拡充改組して航空宇宙庁(National Aeronautics and
 Sapce Administration)を発足させた続いて1961年に
ケネディ大統領は10年以内に月に人間を着陸させると
言うアポロ計画を発表した.
アポロ計画と溶接に関する諸問題.アポロ計画に使用
されたロケットはサターン5型で,その高さは110メー
トルもあり現在までに米国で使用された宇宙ロケットの
表1宇宙開発に関する主要事項の一部
*原稿受付平成元年11月13日,平成元年4月溶接学
会春季全国大会にて特別講演
**推薦会員マサチューセッツ工科大学教授,Guest
 Member,Professor,Massachusetts Insti-tute of Technology
29

422 特別講演内容 増渕:宇宙溶接について
中で最大のものである(詳細は参考文献1～4参照).
燃料を満載して月に向かって出発する場合の重量は約
2600トンあるが,その自重は約170トンしかなく,非常
に多重の燃料(ケロシン及び液体水素)及び酸化剤(液
体酸素)を使用する.これは地球の重力圏を脱出するた
めに巨大なエネルギーを必要とするからで,当然これら
の燃料及び酸化剤を貯蔵する大きなタンクが必要であ
る.その材料としては軽くて,かつ低温における靭性の
優れたアルミニウムが選ばれ,2219及び2014合金が広
く用いられた.これらのタンクは溶接建造でガスタング
ステンアーク(GTA)及びガスメタルアーク(GMA)溶
接法が使用された.
アポロ計画は大体において計画通り進行し,1969年に
はアポロ11号が月面着陸を達成した.しかしこれだけの
大規模で複雑なプロジェクトともなると,いろいろな問
題も発生した.2000番系のアルミニウムー銅合金は航空
機体用には以前から広く使用されていたが,航空機体は
主として鋲構造であり,サターン5型のような巨大な構
造物を全溶接で建造すると言う経験はなかった.そのた
め溶接に関しては(1)ブローホールが発生しやすい,(2)
熱処理合金を使っているので継手強度が母材より低下す
る,(3)溶接変形を生じやすいなどの問題が起き,これら
の問題を解決するためにNASAでは多額の研究費を注
ぎ込んだ.
宇宙環境での溶接実験.宇宙環境での溶接に関する実
験であるが,1969年にソ連がソユーズ6号人工衛星の飛
行中に行ったものが最初である.米国は1973年にスカイ
ラブ(Skylab)の中で溶接に関連したいくつかの実験を
行った.スカイラブ計画ではサターン5型のロケットの
本体を利用してその内部に実験室を作り地球の上空を人
工衛星のようにまわらせ多くの実験を行った.溶接に関
連した実験についてもう少し詳細を後述する.
スペースシャトル計画.1980年代にはいってからの米
国における有人宇宙飛行計画の主体はスペースシャトル
である.1982年にはその第一機コロンビア号が宇宙飛行
を行った。溶接技術の面ではスペースシャトルはサター
ン5型の延長と見てよく,その頃はアルミニウムの溶接
技術も確立されており特に問題は無かった4}.
宇宙ステーション計画の初期.1980年代に入ってス
ペースシャトルの次の有人宇宙計画として宇宙ステー
ション(宇宙基地)が検討されるようになった.計画の
発端は1992年がコロンブスがアメリカ大陸を発見して
丁度500年になるのでその記念事業の一端として考えら
れたが,実行はこの予定より遅れている.またこの計画
はアメリカだけでなく,日本,カナダ,及び西ヨーロツ
パ諸国(EC諸国)と共同することになった .
1982年秋に 「宇宙ステーションが建造された場合その
中でどんな研究をしたら良いか 」 についてNASAは全
米で研究案を公募した.1000件以上の申し込みがあり,
300件以上の公式提案が提出されたが,その中で18件が
採用になった.この18件は物理,化学,生物学,医学な
ど広い分野にわたり,工学関係は3件でMITの私の研
究室から提出された溶接に関する研究案がはいってい
た.これらの18件のテーマについては1983年に初期研
究が行われた.MITからは"Feasibility of Remotely
 Manipulated Welding in Space-AS tep in the Devel-opment of Novel Joining Technologies"と言う最終報
告書をNASA本部のOffice of Space Sciince and
 Applicationsに提出した.この報告では以下の点につ
いて述べている:
(1)宇宙において予想される接合を必要とする業務
(2)宇宙溶接において要求される自動化及び無人化
(3)宇宙溶接に関する新しい接合法及び機器
(4)将来行うべき研究開発計画.
この研究の成果についてはもう少し詳細を後述する.
チャレンジャー号の爆発事故及びその後の状況.1986
年にスペースシャトルのチャレンジャー号が発射時に爆
発すると言う大事故が起こりNASAの予算の大きな部
分な代替のスペースシャトルを建造することに使われ,
宇宙ステーションをはじめ多くの計画が大幅に遅れた.
1986年にはNASAの内部にSpace Station Working
Groupと言う組織ができ,私は"On-Orbit Joining
 Technology for Maintenance and Construction"と言
う題で講演をした.一方NASAのジョンソン宇宙セン
ターでは以前からSatellite Services Working Group
があり従来は主としてスペースシャトルのサービス及び
メインテナンスを検討していたが,最近は宇宙ステー
ションに主題が移りつつある.私の知っている限りでは
現在の段階では溶接を含め宇宙での建造及び修理技術を
いかに開発すべきかについてNASAとして統一された
案は確立されていない.宇宙構造物への溶接の使用につ
いてのNASAの現在での見解は以下のように要約でき
る.:
(1)現在計画中の宇宙ステーションの建造は主として
機械接合により,溶接は使用しない.
(2)しかし宇宙ステーションの中で溶接に関する実験
を行う確立は高い.
(3)宇宙ステーションの修理には溶接を使用せざるを
得ないのではないか.
(4)宇宙ステーションよりも将来の計画ではより大き
30

溶接学会誌第59巻(1990)第6号423
な宇宙構造物が必要で,その際は溶接を使用することが
どうしても必要になる.
3.宇宙環境での溶接実験
ソ連での実験.宇宙環境における溶接に関する実験を
最初に行ったのはソ連で,1969年にソユーズ6号の飛行
中であった.その内容について西側で発表されたものと
して参考文献7)がある.この論文は主として米国の宇宙
開発について述べているのでソ連での研究については省
略するが,研究の対象となった溶接法と材料とは下記の
ごとくである:
溶接法:電子ビーム溶接
プラズマアーク溶接
消耗アーク(GMA)溶接
材料:ステンレス鋼
アルミニウム合金
Al-Cu合金
チタニウム合金.
その後もソ連では宇宙溶接について実験をおこなってい
る.例えば1984年頃サリュート7号の飛行中に手持ちの
電子ビーム溶接装置を使って溶接に関する実験をおこ
なったという.
米国での実験.米国では1973年にスカイラブの中で宇
宙溶接に関連した実験を行った.これらの実験は下記の
3種類である:
(a)金属溶融実験M551
(b)ろう付け実験M552
(c)球作製実験M553.
金属溶融実験では電子ビームを用いて金属が無重力の下
でいかに溶融するかを調べた.材料としてはアルミニウ
ム合金,ステンレス鋼,及び酸化トリウムを散らせたニッ
ケルの3種類が用いられた.ろう付け実験では無重力下
で管のろう付けがどのように出来るかを検討した.熱源
としてはテルミットを使用した.球作製実験では電子
ビームで溶解された金属がいかに完全な球状に凝固する
かを調べた.米国ではその後宇宙環境における溶接に関
連した実験は行われていない.
4.MITにおける宇宙溶接に関連する研究
前述したようにMITの私の研究室では1983年に
NASAのスポンサーで宇宙溶接に関する研究を行っ
たfi,9).これが契機となり今日までいろいろの形で宇宙溶
接に関して研究を行って来たので,その概要を述べる10}.
4。1宇宙溶接に関する文献調査及び溶接につい
て
私の研究室では1983年以来宇宙溶接に関する文献に
ついての調査を継続的に行っている.調査はMITの図
書館にあるデータベースを主体にし,その他に色々の形
で入手した情報を追加している.当然の成り行きとして
米国を含めたアメリカ大陸及び西ヨーロッパ諸国の資料
が多く,ソ連を含めた東欧圏や,日本,中国などの情報
は限られている.
宇宙溶接に関する研究論文が書かれるようになったの
は1960年代のことで,スコルハマーが1963年に発表し
た宇宙での電子ビーム溶接に関する論文")が学会で発表
された論文として最初である.表2は宇宙溶接に関する
文献を国別及びプロセス別に分類したものである.こ
の表は1986年に行った調査の結果で全体で125の論文
があった.1989年の調査ではその後約15増えているよ
うである.
国別で言うと米国とソ連とが圧倒的に多いが,これは
宇宙開発がこの二国を主体に行われていることから当然
理解出来ることである.非常に特徴にあることは日本の
論文が全く無いことである.日本は長い間溶接に関する
研究が盛んでほとんどの分野で多くの論文が書かれてい
るにも拘わらず宇宙溶接に関するものは皆無である.
1990年代に打ち上げられる予定の宇宙ステーション計
画には日本も参加する予定であるから,近い将来に宇宙
溶接に関する研究が日本でも盛んになるのでは無かろう
か.
表2について溶接法と言う面から検討して見ると,電
子ビーム溶接に関する文献がもっとも多い.宇宙は真空
であるから電子ビーム溶接が適しているのではないかと
誰でも思うことである.前述したソ連及び米国ですでに
行った宇宙環境での実験でも電子ビームに関する実験が
入っている.しかし電子ビーム溶接を宇宙ステーション
内で使うことに関しては以下の様な問題を解決する必要
がある:
(1)高い電圧を使用するが,充分電源があるか,
(2)いかにして作業員の安全を確保するか,
(3)いかにして精度の高い継手開先を得るか.
ろう付けについても関心が強い.宇宙溶接では使用可
能の電力に厳しい制限があるのでテルミットのように溶
接に必要なエネルギーを内蔵した溶接システムの利用度
は高いと思う.圧接,超音波溶接,摩擦溶接など溶融金
属を使用しないCold Weldingも宇宙溶接には適してい
る.たとえば,MITでは真空中で摩擦溶接の実験を行っ
たが良好な結果が得られた.ただし,地上で一般に使用
31

424 特別講演内容増渕:宇宙溶接について
表2宇宙接合に関する文献の接合法別及び国別の分類
()=Studied in "WELDING IN GENERAL*"
しているこれらの溶接装置は非常に重いので,宇宙で使
用するには思い切った軽量化が必要である.
地上における溶接では各種のアーク溶接法が圧倒的に
広く使われている.こうしたアーク溶接法が宇宙溶接に
適しているかどうかについてはいろいろと議論がある.
アークの周囲の圧力が低下するとアークは段々大きくな
りボーツとしてきて不安定になり,ある程度以下の圧力
ではアークを発生,維持することができなくなってくる.
それではアークの周囲に少量のガスを吹き付けアークの
安定化を図ってはどうかと言う意見もある.私の個人的
な意見ではガスタングステンアーク溶接を使用する可能
性はあるが,複雑な溶融金属の移行を伴うガスメタル
アーク溶接を宇宙で使う可能性は非常に少ないと思う.
スタッド溶接はアーク溶接と言っても圧接に近く溶融
金属の移行がほとんど無くしたも全作業が自動化されて
いるので宇宙での完全自動溶接に適していると思う.
MITではスタッド溶接の宇宙での応用に関連してある
程度の基礎実験を行った10,13).
なお参考文献14)は1966年に書かれたものであるが,
9種類の溶接法について宇宙で使用した場合の長所およ
び問題点について詳しい検討をしている.
4.2宇宙溶接作業についての検討
4.2.1.溶接の必要性の吟味.第一に宇宙における金属
の溶接は本当に必要なのであろうか,あるとしたらどん
な用途があるのかを考えて見る必要がある.溶接が機械
接合や接着(Adhesive bonding)に比べて優れている点
は:
(1)広い温度範囲で強度の高い継手がえられる,
(2)継手の剛性が高い,
(3)気密及び水密性の高い継手が得やすい.
しかし,溶接には次の様な問題点もある:
〔4)溶接と一口に言っても多くの方法があり,ひとつ
の方法を使うにしても材料の種類,板厚などにより溶接
材料,溶接条件などを変える必要がある,
(5)溶接に際して高熱を使用するので材料が変質し,
また残留応力や変形を生ずる,
(6)溶接作業を行うのに熟練を要する,
(7)溶接作業と一口に言っても以下のように異なった
作業を必要とする:
a)部材を切断し接合面の開先を作製する,
b)溶接すべき部材を取り合わせ,溶接中移動しない
ように保持する,
c)溶接部の近くの表面を清浄にする,
d)溶接作業を行う,
e)溶接部の検査を行う.
従って溶接で工事を行う場合,溶接に関する熟練者の他
に切断,取付け,非破壊検査などの熟練者を必要とする.
地上での工事の場合はそれぞれの熟練者を容易すること
はそれほど困難ではないが,宇宙では作業員(宇宙飛行
士)の数は非常に制限されている.従ってこれほど面倒
な事までして溶接をする必要あるのかと言うことが検討
されることと思う.
4.2.2.予想される溶接作業.宇宙で必要とされる溶接
作業は勿論多種多様にわたるが,大別すると以下に分類
32

溶接学会誌第59巻(1990)第6号425
される:
第1種:機器その他の簡単な修理,製作,取付けなど.
第2種:主要構造物の修理.
第3種:構造物の宇宙での建造.
第1種は簡単な溶接作業でその一部のものは溶接作業
に関して何ら経験のない作業員(宇宙飛行士)でも実施
できると思う.私の研究室ではかねてより水中溶接の自
動化について研究をしており,その一環としてインスタ
マティック溶接システムと言うアイディアを開発し
た.図1にその数例を示す.ここに示したような簡単な
溶接作業ならば完全に無人化された器具で作業者が始動
ボタンを押すだけで溶接が可能であろう.この考え方は
最近におけるカメラ産業の傾向からヒントを得たもので
ある.もう15年以上前になると思うがコダック社がイン
スタマティックカメラと名づけた簡単なカメラを開発し
たが,それが契になって世界中のカメラメーカーが誰で
も操作できるカメラの開発を盛んに行った.初めのうち
はその性能は余りよくなかったが,段々と性能が向上し
最近のカメラは非常に高性能であり,最近では大型の高
性能のカメラは一部のプロフェッショナル以外は使って
いない.私の基本的な考えもこれと同じで,完全に無人
化された溶接システムの開発が可能であると思う.初め
は簡単な作業しか出来ないと思うが段々複雑な作業もで
きるものが開発できると思う.MITの提案がNASAで
採択された大きな理由はこのアイディアが受入られたも
のと思っている.
第2種の主要構造物の補修に関してNASAの関係者
が非常に心配しているのは隕石その他の異物が宇宙ス
テーションに衝突して構造部材を破損する(例えば壁に
穴をあける)ことである.最近グラマン社がNASAから
の依頼でこの問題について研究をおこなった15).
第3種の大型構造物の溶接による新造はいずれは行わ
れるであろうが,大分将来(例えば2020年代)のことに
なると思う.
4.2.3.宇宙溶接作業の環境.宇宙空間での溶接作業が
地上でのそれと異なることは1
(a)真空に非常に近い
(b)重力が非常に小さい(スペースステーションの自
転によりある.程度の遠心力が発生する)
(c)温度について言うと,太陽に向いている側の温度
はかなり高いが,反対側の温度は非常に低い.ただしこ
れらの状態は宇宙ステーションのどこで溶接作業を行う
かによって異なってくる.典型的な例として以下の三つ
のケースが考えられる(表3参照):
ケース1:完全に宇宙ステーション外での作業
ケース2:宇宙ステーション上ではあるが外部に暴露
している場所での作業
ケース3:宇宙ステーション内の居住区での作業.
ケース3では後述するように居住区での環境汚染につ
いて非常に厳しい制限があると思われるので居住区での
溶接作業が行われることは稀であると思う.
最も多くありぞうなのはケース2である.宇宙ステー
図1インスタマティック溶接システムの数例
33

426 特別講演内容増渕:宇宙溶接について
表3宇宙溶接建造の特長
(1)DIFFERENCES IN ENVIRONMENTS
(2) REMOTENESS FROM THE EARTH
(A) TELEPRESENCE OF EXPERTS
(B) REMOTE MANIPULATION
(C) PACKAGING OF OPERATIONS INVOLVED IN
WELDING FABRICATION-" INSTAMATIC"R SYSTEMS-ション上でありかつ外部に暴露している箇所,普通の家
で言えばガレージで外部へ戸を開け放ったような状態,
で溶接作業をする確立は高いと思う.
ケース1で溶接作業をすることはいつかは行わなけれ
ばならないであろうが,大分将来のことと思う.
宇宙ステーションには全体で8人ぐらいしか乗員がお
らず,しかもこの人数で何から何までしなければならな
いから宇宙飛行士に溶接の技術まで要求することは極め
て難しい.勿論溶接の必要が出たときに溶接の出来る宇
宙飛行士をシャトル便で送ることは可能であるが溶接に
関しては限られた知識と技能をもった作業員を使って溶
接作業をできるようにして欲しいと言う強い要求があ
る.その方法としては次のことが考えられる:
(a)エキスパートの遠隔存在,
(b)遠隔操作による溶接,
(c)溶接作業のパッケージングによる無人化.
第1は地球上,例えばジョンツン宇宙センターに溶接
の専門家を呼んでおいて,宇宙飛行士と電話で話をして
適当な指示を与えることである.第2は原子力関係の作
業に良く使われているようなマスター/スレーブ遠隔操
作装置を利用することである.第3はインスタマティソ
ク溶接システムのような溶接に関連したいろいろの作業
を組み込んだ無人溶接装置を開発して使用することであ
る.実際には以上の方法を組み合わせた方式が取られる
のではないかとおもう.
マスター/スレーブ方式の遠隔システムを宇宙溶接に
使用した場合の基礎実験をMITで行ったが,地上と宇
宙とでは距離が大きくマスター/スレーブでは溶接のよ
うにデリケートなコントロールを必要とする場合には向
かないと言う結論が出た9).
4.2.4,宇宙作業における特殊な制限.宇宙で溶接作業
を行うに際しては地上では考えられない様な制限があ
る.そのいくつかについて以下に述べる:
(1)電力の制限及び電源に対する衝撃的影響.宇宙ス
テーションでは電力が極めて制限されている.電力は主
として太陽電池により50KVA位と言われているが,こ
の量はアメリカの一軒の民家にある電源の量と大体同じ
位に過ぎない.しかも溶接の特徴は大電流をほんの短期
間使用するので,電源に対して衝撃的影響を与え近傍に
あるコンピュータなどデリケートな電子機器を狂わすこ
とがある.
(2)環境汚染に関する厳しい制限.溶接に際してはガ
スを使用したり,スパークを出したり,熱を発生したり,
音を出したりする.一方宇宙ステーション,特に居住区
内においては環境汚染について非常に厳しい制限を設け
ることになる.
.(3)限られた人力.前述した様に宇宙ステーションの
乗員は8人位と言われている.しかも乗員にかかる費用
は非常に高いのでこれらを出来るだけ大切な実験や観測
に利用し,溶接など修理作業は出来るだけ機械によって
行いたいと言う要望が強い.
紙面の関係上これ以上の議論は行わないが宇宙での溶
34

溶接学会誌第59巻(1990)第6号427
接作業を行うにあたって多くの問題を解決する必要があ
る.
5.将来の可能性,宇宙溶接技術の他への応用
本文の冒頭で述べたように宇宙溶接技術の現状を一言
で言えば夜明け前のようなものである.今後どのように
発展して行くかは誰にもわからないが,1990年代には宇
宙ステーションが建設される計画であるし,将来にはさ
らに大きな宇宙構造物が建設され使用されることになる
であろう.こうなればいつれは宇宙空間で溶接を使った
修理や構造を行わざるを得ない.
私の意見としては宇宙溶接を成功させる鍵は溶接に
伴ったいろいろな作業をすべて含め,かつ完全に無人化
された"lntegrated and automated fabrication system"
を如何にして開発するかにあると思う.もしこうしたシ
ステムが開発されれば,水中工事,高所での工事,原子
炉の修理など多くの方面に利用できると思うが,紙面の
関係もあるのでここでは省略する.
6.あとがき
宇宙溶接の現状についについて簡単に述べた.宇宙に
おいて溶接作業を実際に行うのは大分先の将来のことで
あるが,いずれは必ず達成されることと信じている.ま
たそのための研究開発も近い将来に盛んになってくるも
のと思う.この論文が日本の溶接技術者,特に若い研究
者,に興味と夢を与えることが出来れば幸いである.
参考文献
1)Masubuchi, K., "Integration of NASA-Spon-sored Studies on Aluminum Welding," NASA
Contractor Report CR-2064, prepared by
Massachusetts Institure of Technology for G.
C. Marschall Space Flight Center, NASA, June
1972, for sale by National Technical Informa
tion Service, Springfield, Virginia, 22151
2) Masubuchi, K., Analysis of Welded Structures,
 Pergamon Press, 1980
3) 増渕興一,"米国における溶接研究の概要と二,三
の実例",溶接学会誌,第39巻,第2号,1970,
103-116
4) 増渕興一,"米国の宇宙開発における接合技術の展
望一アポロ計画からスペースステーションまで",
ジョイテック,第5巻,第8号,103-108,1989
5) 阪野賢治,"宇宙基地計画の概要と構造に関連した
技術上の課題",溶接学会誌,第55巻6号,1986,
370-376
6) Masubuchi, K., et al., "Feasibility of Remotely
Manipulated Welding in Space-A Step in the
Development of Novel Joining Technologies,
"Final Report under Contract No
. NASW-3740 submitted from MIT to Office of Space
Sceince and Applications, NASA Headguar
ters, Washington, D. C., September 1983 ‚Ü‚½
この報告書の要約はNASA Langley Research
 Centerで開催されたシンポジウムにおいて発表
され卞記に掲載されている
NASA Conference Publication 2387, Welding,
Bonding, and Fastening, 1984, 271-296
7) Paton, B,E.,"Welding in Space," Welding Engi
neer, Vol. 57, No. 1, January 1972, 25-29
8) Siewert, T. A., et al., "The Skylab Brazing
Experiment," The Welding Journal, Vol. 56,
No. 10, 1977, Research Supplement, 291 s-300 s
9) Agapakis, J. E., Masubuchi, K., and von Alt,C.,
"Fundamentals and Advances in the Develop
ment of Remote Welding Fabrication Sys
tems," The Welding Journal, Vol. 65, No. 9,
1986.21-32
10) 今北明彦,"宇宙溶接",日本造船学会誌,第707号,
昭和63年5月.277-282
11) Schollhammer, F. R., "Electron Beam Welder
for Space", National Symposium on Materials
for Space Vehicle Use, Seattle, Washington,
Society of Aerospace Material and Process
Engineers, Nov. 1963, p. 51
12) Guza, D. E., "Inertia Friction Welding of Alu-minum Alloys for Space Repair Applications,"
M. S. Thesis, MIT, January 1988
13) Masubuchi, K., Imakita, A., and Miyake, M.,
"An Initial Study of Remotely Manipulated
Stud Welding in Space Applications," The
Welding Journal, Vol. 67, No. 4, 1988, 25-34
14) Engquist, R. D., and Nord, D. B., "Study of
Space Environment Fabrication and Repair
Techniques-Feasibilty Report", Report Con
tract NAS 9-4548, from Hughes Aircaft Co. to
NASA Manned Spacecraft Center
15) Grumman Aerospace Corporation, "Major
Repair of Structures in an Orbital Environ-ment," Report No. SA-ROS-4 prepared
under Contrect NAS 8-36436 for G. C. Mar
shall Space Flight Center, NASA, June 1987
35